

(12)特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2002 年 6 月 27 日 (27.06.2002)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 02/50506 A1

(51) 国際特許分類: G01M 11/02, H01L 21/027, G03F 7/20

(21) 国際出願番号: PCT/JP01/11044

(22) 国際出願日: 2001 年 12 月 17 日 (17.12.2001)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願 2000-383081
2000 年 12 月 18 日 (18.12.2000) JP
特願 2000-383086
2000 年 12 月 18 日 (18.12.2000) JP(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 株式会社
ニコン (NIKON CORPORATION) [JP/JP]; 〒100-8331
東京都千代田区丸の内 3 丁目 2 番 3 号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: および

(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 谷口 哲夫 添付公開書類:
(TANIGUCHI, Tetsuo) [JP/JP]; 〒100-8331 東京都千 ー 国際調査報告書

代田区丸の内 3 丁目 2 番 3 号 株式会社 ニコン内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 立石 篤司 (TATEISHI, Atsuji); 〒194-0013 東
京都町田市原町田 5 丁目 4 番 20 号 パセオビル 5 階 Tokyo (JP).

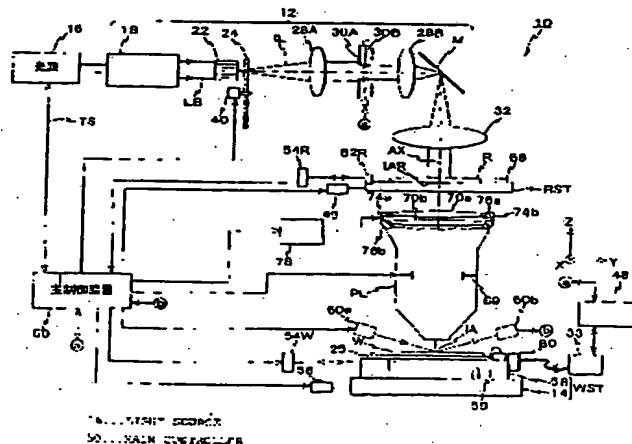
(81) 指定国 (国内): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, PI, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZW.

(84) 指定国 (広域): ARIPO 特許 (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SI, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ特許 (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[続葉有]

(54) Title: WAVEFRONT MEASURING APPARATUS AND ITS USAGE, METHOD AND APPARATUS FOR DETERMINING FOCUSING CHARACTERISTICS, METHOD AND APPARATUS FOR CORRECTING FOCUSING CHARACTERISTICS, METHOD FOR MANAGING FOCUSING CHARACTERISTICS, AND METHOD AND APPARATUS FOR EXPOSURE

(54) 発明の名称: 波面計測装置及びその使用方法、結像特性計測方法及び装置、結像特性補正方法及び装置、結像特性管理方法、並びに露光方法及び装置



(57) Abstract: A wavefront measuring apparatus comprises a spatial image measuring instrument (59) for measuring the projected image of a specific pattern projected by a projection optical system (PI) and a wavefront measuring instrument (80) for measuring the wavefront aberration of the projection optical system. The focusing characteristics of the optical system are calculated by a main controller (50) from a measurement result by

[続葉有]



2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

the spatial image measuring instrument and a measurement result by the wavefront measuring instrument. Therefore, the influence of the aberration included in the measurement result of the spatial image measured by the spatial image measuring instrument is corrected by the main controller from the measurement result of the wavefront aberration, so that the focusing characteristics of the projection optical system is precisely calculated. That is, the focusing characteristics of the projection optical system are precisely adjusted on the basis of the calculational result.

(57) 要約:

投影光学系（PL）による所定のパターンの投影像を計測する空間像計測器（59）と、投影光学系の波面収差を計測する波面計測器（80）と、を備えており、空間像計測器による計測結果と、波面計測器による計測結果とに基づいて、主制御装置（50）により、光学系の結像特性が算出される。従って、空間像計測器により計測される空間像の計測結果に含まれる収差の影響が波面収差の計測結果に基づいて主制御装置により補正されるので、結果的に投影光学系の結像特性を精度良く算出することができる。すなわち、この算出結果に基づいて投影光学系の結像特性を調整することで、投影光学系の結像特性を高精度に調整することができる。

明 細 書

波面計測装置及びその使用方法、結像特性計測方法及び装置、結像特性補正方法及び装置、結像特性管理方法、並びに露光方法及び装置

技術分野

本発明は、波面計測装置及びその使用方法、結像特性計測方法及び装置、結像特性補正方法及び装置、結像特性管理方法、並びに露光方法及び装置に係り、更に詳しくは、所定のパターン像を投影する光学系の結像特性を計測する結像特性計測方法及び結像特性計測装置、前記結像特性計測方法に好適に用いることができる波面計測装置及びその使用方法、前記結像特性計測方法を含む結像特性補正方法及び前記結像特性計測装置を含んで構成される結像特性補正装置、前記光学系の結像特性を管理する結像特性管理方法、並びに前記結像特性補正装置を含んで構成される露光装置及び前記結像特性補正方法を含む露光方法に関する。

背景技術

従来より、半導体素子、液晶表示素子等を製造するリソグラフィ工程では、ステップ・アンド・リピート方式の縮小投影露光装置（いわゆるステッパ）や、ステップ・アンド・スキャン方式の走査型投影露光装置（いわゆるスキャニング・ステッパ）などの露光装置が用いられている。

近年、これらの露光装置では、半導体素子等の高集積化に伴って回路パターンが微細化し、これに対応して解像力の向上を図るため様々な超解像技術が用いられるようになってきた。これに伴い、使用される投影光学系に対し、その収差を極限まで抑えることが要求されてきている。このため、計測用パターンを投影光学系を介して基板上に投影し、その投影像（空間像）を計測した計測

結果や、前記計測用パターンを基板上に焼き付けて得られるレジスト像の線幅等の計測結果に基づく投影光学系の結像特性の評価だけではなく、投影光学系の波面収差を計測し、その結果により、厳密に収差の調整を行う必要が出てきた。

このため、従来においても、投影光学系を露光装置に組み付ける前の投影光学系単体での調整工程において、投影光学系を専用の波面計測機（例えば、干渉計などを用いて、投影光学系の波面収差を計測する大型の計測機）に搭載して、その波面収差を計測し、その計測結果に基づいて厳密に収差を調整することがなされていた。

しかしながら、その後の半導体素子の更なる高集積化に伴い、最近では、投影光学系単体での状態と露光装置本体に組み込んだ後の状態との環境の変化や、露光装置本体に組み込む際の不慮の事故、あるいは出荷直前に計測することによる品質保証の観点から、投影光学系を露光装置本体に組み込んだ後に投影光学系の波面収差を計測する必要性が生じてきた。

かかる必要性に応えるべく、投影光学系を露光装置本体に組み込んだ後にその波面収差を計測可能な波面計測装置の研究・開発が露光装置メーカーなどで現在盛んに行われている。

投影光学系を露光装置に搭載した状態（いわゆるオン・ボディ）で、その投影光学系の波面収差を計測できる波面計測装置としては、基板（ウエハ）が載置される基板ステージ（ウエハステージ）に装着するタイプ、あるいはウエハステージと交換するタイプ等が考えられる。

しかるに、波面計測はそれほど頻繁に行う必要はないため、波面計測装置は、通常は殆ど使用されないものである一方、波面計測装置は、それ自体のキャリブレーションを所定間隔で行う必要があるのに加え、高価である。従って、複数の露光装置間で1つの波面計測装置を共用できることが望ましい。かかる理由により、基板ステージに着脱自在に取付け可能なタイプや、基板ステージ

と交換して使用するタイプなどの、計測時にのみ露光装置に装着する小型の波面計測器が、昨今の開発の主流となっている。

しかしながら、上記の計測時にのみ露光装置に装着する波面計測器は、着脱自在であるが故に、露光装置の通常の使用時には、波面収差を容易、かつ迅速に計測することは難しいことになる。

また、上記の波面計測器は、投影光学系の波面収差を厳密に計測できるが、パターン像の結像位置の計測、具体的には、光軸に垂直な方向の結像位置ずれの計測（いわゆるディストーション計測）、及び光軸方向の結像位置ずれの計測（いわゆる像面計測）を精度良くできる構成とはなっていない。その理由は、次の通りである。

すなわち、上記の波面計測器を用いて例えば上記のディストーション計測を行う場合には、投影光学系の物体面にピンホールが形成されたレチクルを配置し、そのレチクルを露光光で照明し、ピンホールから射出された光を投影光学系及び波面計測器内の受光光学系を介して受光素子で受光しなければならない。このため、ピンホールの位置と波面計測器内の受光光学系を構成する対物レンズの光軸中心とが合っていないと、波面が傾いていないにもかかわらず、波面計測器では波面の傾きとして計測される。すなわち、波面計測器でディストーション計測を高精度に行うためには、波面の傾きを精度良く計測することが不可欠となる。

しかし、波面計測器は、波面の形状を計測するためのものであって、波面全体の傾きを計測するためのものではない。このため、ディストーション計測を行うために必要とされる精度で波面の傾きを計測するほどの性能を有していない。従って、上記ピンホールの結像位置を、十分に高い精度で計測することは難しく、上記のような性能を満足させるためには、波面計測器が必然的に大型化、重量化し、基板ステージに着脱するという本来の目的の達成が困難となる。また、計測性能を上げるために高価となる。

また、上述した波面計測器を用いて上記の像面計測を行う場合を考えると、露光装置に備えられる、基板上の複数の計測点における投影光学系の光軸方向に関する位置を計測する多点焦点検出系（多点AF系）を用いて波面計測器の光軸方向位置を検出しつつ、計測を行うことが考えられる。

しかしながら、多点焦点検出系の計測ポイントは、所定の間隔を隔てて設定されているため、投影光学系の像面を広範囲にわたって検出している。そのため、投影光学系の像面の任意の位置を正確に計測することは困難である。

かかる理由により、波面計測器は、投影光学系のパターン像の結像位置の計測には、不向きな構成となっている。

また、特にウエハステージに装着するタイプの場合、投影光学系のウエハ側の端面とウエハステージとの間の狭い空間に取り付けなければならない。そのため、波面計測装置を小型化して、この狭い空間に入れなければならない。その場合、波面計測装置を構成するCCD等の光電検出器の光電変換時の発熱、あるいは該光電検出器の駆動回路、例えば電荷転送制御回路等の電気回路の発熱が、波面収差の計測に与える影響が問題となる。かかる発熱が波面収差の計測に与える影響は、ウエハステージと交換するタイプにおいても、程度の差こそあれ、同様に問題となる。

上述した発熱が波面収差の計測へ与える影響としては、次の(a)~(c)が代表的に挙げられる。

- (a) 投影光学系の収差が本来の使用時（露光時）と収差計測時とで異なり、露光時における投影光学系の収差を正確に求めることができなくなる。
- (b) 前記の空間の近傍には、ウエハの水平面内の位置を計測するレーザ干渉計や、ウエハの光軸方向の位置を検出するフォーカス位置検出系などの光学的な位置計測装置が設けられており、波面計測に際しては、これらの位置計測装置が波面計測装置の位置計測に用いられる。しかし、上記の発熱により、それらの位置計測装置の計測ビームにいわゆる空気揺らぎ（温度の揺らぎ）が発生

し、結果的に波面収差の計測精度を低下させてしまう。

(c) 波面計測装置自体の温度が変化し、安定な波面収差の計測が困難になってしまう。

上記のような熱による、波面計測への影響は、従来の波面計測機においては、発熱源となる構成部分を波面計測に与える影響が問題とならなくなる位置まで遠ざける等して解決していたが、オン・ボディで投影光学系の波面収差を計測する場合には、露光装置の構成上かかる手法を採用することは困難である。

本発明は、かかる事情の下になされたもので、その第1の目的は、被計測光学系の波面収差を高精度に計測することが可能な波面計測装置を提供することにある。

また、本発明の第2の目的は、精度の高い波面収差の計測を実現する波面計測装置の使用方法を提供することにある。

また、本発明の第3の目的は、光学系の結像特性を精度良く計測することが可能な結像特性計測方法を提供することにある。

また、本発明の第4の目的は、光学系の結像特性を精度良く計測することが可能な結像特性計測装置を提供することにある。

また、本発明の第5の目的は、光学系の結像特性を高精度に補正することが可能な結像特性補正方法を提供することにある。

また、本発明の第6の目的は、光学系の結像特性を高精度に補正することが可能な結像特性補正装置を提供することにある。

また、本発明の第7の目的は、光学系の結像特性を高精度に維持する効率的な結像特性管理方法を提供することにある。

また、本発明の第8の目的は、高精度な露光が可能な露光方法を提供することにある。

また、本発明の第9の目的は、高精度な露光が可能な露光装置を提供することにある。

発明の開示

本発明は、第1の観点からすると、被計測光学系の波面収差を計測する波面計測装置であって、計測時に前記被計測光学系を通った光が入射する受光光学系と；該受光光学系を介して前記光を受光する受光素子を含む受光部と；前記受光光学系と前記受光部とを所定の位置関係で保持する筐体と；前記受光部と前記受光光学系との間に配置される断熱部材と；を備える第1の波面計測装置である。

これによれば、筐体により、受光光学系と受光部とが所定の位置関係で保持されている。また、受光部と受光光学系との間には、断熱部材が配置されている。このため、波面収差の計測に際し、被計測光学系を通った光が、受光光学系を通過した後、受光部を構成する受光素子で受光され光電変換される際に該受光素子が発熱したり、受光部内の電気回路が発熱したりして、受光部から熱が発生するが、この熱が受光光学系に伝達されるのが、断熱部材によって有効に抑制される。従って、受光光学系の温度変化を抑制することができ、これにより波面収差の高精度な計測を長期に渡って安定して行うことが可能となる。

この場合において、前記筐体は、前記受光部からの輻射熱が外部に伝達されるのを防止する遮熱部を有することとすることができる。本明細書において、「遮熱部」とは、筐体とは別の遮熱板などの遮熱部材、及び筐体の少なくとも一部が断熱性を有する材質（例えばセラミック等）で形成された場合におけるその筐体の一部の、いずれをも包含する概念である。

本発明の第1の波面計測装置では、前記受光光学系を構成する光学素子の近傍の前記筐体に固定された少なくとも1つの温度センサと；前記被計測光学系及び前記受光光学系全体の波面収差の計測を行うとともに、その計測中の前記温度センサの測定結果に基づいて所定のタイミングで前記受光光学系単独の波面収差の計測を実行する制御装置と；を更に備えることとすることができる。

この場合において、前記筐体は、前記受光部からの輻射熱が外部に伝達され

るのを防止する遮熱部を有していても良い。

本発明は、第2の観点からすると、被計測光学系の波面収差を計測する波面計測装置であって、計測時に前記被計測光学系を通った光が入射する受光光学系と；該受光光学系を介して前記光を受光する受光素子を含む受光部と；前記受光光学系と前記受光部とを所定の位置関係で保持する筐体と；前記筐体に設けられ、前記受光部からの輻射熱が外部に伝達されるのを防止する遮熱部と；を備える第2の波面計測装置である。

これによれば、筐体により、受光光学系と受光部とが所定の位置関係で保持されている。また、筐体に、受光部からの輻射熱が外部に伝達されるのを防止する遮熱部が設けられている。このため、波面収差の計測に際し、前述のようにして受光部から熱が発生した際に、この熱が輻射熱となって外部に伝達されるのが、遮熱部によって阻止される。この場合、受光部の一侧（遮熱部側）に被計測光学系を配置することにより、その被計測光学系の温度上昇による波面収差の変動や、受光部の一侧の空間内の気体の温度揺らぎ等を効果的に抑制することができる。従って、所望の状態における被計測光学系の波面収差を精度良く計測することが可能となる。

この場合において、前記受光光学系を構成する光学素子の近傍の前記筐体に固定された少なくとも1つの温度センサと；前記被計測光学系及び前記受光光学系全体の波面収差の計測を行うとともに、その計測中の前記温度センサの測定結果に基づいて所定のタイミングで前記受光光学系単独の波面収差の計測を実行する制御装置と；を更に備えることとすることができる。

本発明は、第3の観点からすると、被計測光学系の波面収差を計測する波面計測装置であって、計測時に前記被計測光学系を通った光が入射する受光光学系と；該受光光学系を介して前記光を受光する受光素子を含む受光部と；前記受光光学系と前記受光部とを所定の位置関係で保持する筐体と；前記筐体に固定された少なくとも1つの温度センサと；前記被計測光学系及び前記受光光学

系全体の波面収差の計測を行うとともに、その計測中の前記温度センサの測定結果に基づいて所定のタイミングで前記受光光学系単独の波面収差の計測を実行する制御装置と；を備える第3の波面計測装置である。

これによれば、筐体により受光光学系と受光部とが所定の位置関係で保持されており、筐体には少なくとも1つの温度センサが固定されている。被計測光学系及び前記受光光学系全体の波面収差を計測する際には、被計測光学系を通った光が受光光学系を通過し、受光部を構成する受光素子に受光され光電変換される。この際に、該受光素子が発熱したり、受光部内の電気回路が発熱して、受光部から熱が発生する。そして、受光光学系や被計測光学系の温度が変化し、計測される波面収差が変動する。この場合、計測される波面収差の変動は、被計測光学系及び受光光学系の変動が混在したものとなっている。しかるに、上記の波面収差の計測の際に、受光部の発熱により生じた筐体の温度上昇は温度センサにより検知されるので、制御装置では、その温度センサの計測値に基づいて所定のタイミング、例えば筐体すなわち受光光学系の温度の変化が所定の閾値を超えたタイミング毎に受光光学系単独の波面収差の計測を実行することが可能である。この場合、前回の受光光学系単独の波面収差の計測が行われてから次に受光光学系単独の波面収差の計測が行われるまでの間は、受光光学系の波面収差は殆ど変化しないものとみなせる。従って、被計測光学系の波面収差の計測の際に、上記の所定のタイミングで受光光学系単独の波面収差の計測を行い、計測された波面収差（被計測光学系及び受光光学系全体の波面収差）から受光光学系単独の波面収差を差し引くことにより、温度変化の影響を受けず、被計測光学系の波面収差を精度良く計測することが可能となる。

本発明は、第4の観点からすると、上記第1～第3の波面計測装置のいずれかの使用方法であって、波面収差の計測に先立って、前記受光部の温度をほぼ飽和状態にする工程を含む使用方法である。

これによれば、被計測光学系の波面収差の計測に先立ち、受光部の温度がほ

ば飽和状態にされるので、温度が飽和状態に近い状態、すなわち温度がほぼ一定値に収束した状態で被計測光学系の波面収差の計測が開始される。このため、温度変化の影響を殆ど受けず、精度の高い波面収差の計測を実現することができる。

本発明は、第5の観点からすると、マスクのパターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光装置であって、上記第1～第3の波面計測装置のいずれかを構成する前記筐体が着脱自在に装着され、前記基板が載置される基板ステージを備える第1の露光装置である。

これによれば、発生する熱が波面収差計測に与える影響の少ない、上記いずれかの波面計測装置が、基板が載置される基板ステージに着脱自在に装着される。このため、投影光学系の波面収差を高精度に計測することができ、この計測結果を利用することにより、投影光学系を介してマスクのパターンを基板上に精度良く転写することが可能となる。この場合、計測された波面収差に基づいて投影光学系の結像特性を精度良く調整し、その調整後の投影光学系を用いてマスクのパターンを基板上に転写しても良いし、計測された波面収差を考慮してマスクのパターンと基板との位置合わせを行うようにしても良い。

また、波面計測装置は、基板ステージに対して着脱自在であるので、波面収差を計測するときのみ波面計測装置を基板ステージに装着し、露光時には取り外すことにより、露光時における基板ステージの位置制御性を向上することが可能となる。この点においても、露光精度の向上が可能である。

本発明は、第6の観点からすると、マスクのパターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光装置であって、筐体及び遮熱板を備えた上記第1～第3の波面計測装置を構成する前記筐体が前記遮熱部を前記投影光学系側に向けた状態で着脱可能であるとともに、前記基板が載置される基板ステージと；前記基板ステージに装着された前記筐体の位置を計測する位置計測装置と；を備える第2の露光装置である。

これによれば、波面計測装置を構成する筐体が遮熱部を投影光学系側に向けた状態で基板ステージに装着される。このため、この状態では、受光部の一侧に位置する投影光学系の温度上昇による波面収差の変動や、受光部の一侧の空間内の気体の温度揺らぎ等を効果的に抑制することができる。また、筐体の位置が位置計測装置によって計測されるが、この計測時における位置計測装置の計測ビームの温度による揺らぎが抑制される。従って、本来の使用時（露光時）と同様の状態における投影光学系の波面収差を精度良く計測することが可能となる。このため、この測定結果を利用することにより、投影光学系を介してマスクのパターンを基板上に精度良く転写することが可能となる。この場合、計測された波面収差に基づいて投影光学系の結像特性を精度良く調整し、その調整後の投影光学系を用いてマスクのパターンを基板上に転写しても良いし、計測された波面収差を考慮してマスクのパターンと基板との位置合わせを行うようにしても良い。また、波面計測装置は、基板ステージに対して着脱自在であるので、波面収差を計測するときのみ波面計測装置を基板ステージに装着し、露光時には取り外すことにより、露光時における基板ステージの位置制御性を向上することが可能となる。この点においても、露光精度の向上が可能である。

本発明は、第7の観点からすると、光学系の結像特性を計測する結像特性計測方法であって、前記光学系による所定のパターンの投影像を計測する第1工程と；前記光学系の波面収差を計測する第2工程と；前記第1及び第2工程の計測結果に基づいて、前記光学系の結像特性を算出する第3工程と；を含む結像特性計測方法である。

これによれば、第1工程で光学系による所定のパターンの投影像が計測され、第2工程で光学系の波面収差が計測される。そして、第3工程では第1及び第2工程の計測結果に基づいて光学系の結像特性が算出される。ここで、第1工程で行われる投影像計測（空間像計測）にあっては、収差の影響を受けるこ

とで空間像を正確に計測できないという欠点があり、第2工程で行われる波面計測にあつては、それだけでは空間像の計測は正確に行なえないという欠点があるが、第3工程において、第1、第2工程の計測結果に基づいて光学系の結像特性が算出されるので、空間像計測と波面計測とのお互いの欠点が補われ、光学系の結像特性を精度良く求めることが可能となる。

この場合において、前記第3工程では、前記波面収差の計測結果に基づいて、前記投影像の計測結果に含まれる、異なる結像特性成分を分離することとすることができる。

この場合において、前記分離される結像特性成分には、歪曲収差成分とコマ収差成分とが含まれることとしても良いし、像面湾曲成分と球面収差成分とが含まれることとしても良い。

本発明は、第8の観点からすると、光学系の結像特性を補正する結像特性補正方法であつて、前記光学系の結像特性を、本発明の結像特性計測方法により計測する計測工程と；前記計測工程における計測結果に基づいて、前記光学系の結像特性を補正する補正工程と；を含む第1の結像特性補正方法である。

これによれば、計測工程で、本発明の結像特性計測方法により光学系の結像特性が計測され、補正工程では、この計測結果に基づいて光学系の結像特性が補正される。この場合、計測工程では、光学系の結像特性を精度良く計測することができるので、この計測結果に基づいて補正工程で光学系の結像特性を高精度に補正することが可能となる。

本発明は、第9の観点からすると、エネルギービームによりパターンが形成されたマスクを照明し、前記パターンを投影光学系を介して基板に転写する露光方法であつて、本発明の第1の結像特性補正方法により、前記投影光学系の結像特性を補正する結像特性補正工程と；前記結像特性補正工程の後に、前記投影光学系を介して前記パターンを前記基板に転写する転写工程と；を含む第1の露光方法である。

これによれば、本発明の第1の結像特性補正方法により、投影光学系の結像特性が精度良く補正され、しかる後、エネルギービームによりマスクを照明してそのマスク上のパターンを結像特性が精度良く補正された投影光学系を介して基板上に転写されるので、基板上にはパターンが精度良く転写される。すなわち、高精度な露光が可能となる。

本発明は、第10の観点からすると、光学系の結像特性を補正する結像特性補正方法であって、前記光学系による所定のパターンの投影像を、第1の結像条件の下で計測する第1計測工程と；前記光学系の波面収差の計測を行う第2計測工程と；前記第1の結像条件とは異なる第2の結像条件下におけるパターンの投影像を、前記第2計測工程の計測結果に基づいて推測し、該推測結果に応じて、前記第2の結像条件下における前記光学系の結像特性を補正する補正工程と；を含む第2の結像特性補正方法である。

これによれば、第1計測工程で、第1の結像条件の下で、光学系による所定のパターンの投影像が計測され、第2計測工程では光学系の波面収差が計測される。そして、補正工程では、第1の結像条件とは異なる第2の結像条件下におけるパターン（第1計測工程で計測されたパターンあるいはその他のパターン）の投影像を、第2計測工程の計測結果（波面収差の計測結果）に基づいて推測し、この推測結果に応じて、第2の結像条件下における光学系の結像特性を補正する。すなわち、第1計測工程で計測されたパターンの投影像の計測結果に基づいてその第1の結像条件下における光学系の結像特性を演算により求めることができ、この結像特性と波面収差の計測結果とを考慮することにより、第2の結像条件下における光学系の結像特性を推測することができ、この推測結果に応じて、第2の結像条件下における光学系の結像特性を補正する。従って、結像条件毎に光学系の空間像計測を行うことなく、結像条件の変更に影響されることなく、光学系の結像特性を高精度に補正することが可能になる。

この場合において、前記第1の結像条件と前記第2の結像条件とは、照明

条件、前記光学系の開口数、及び前記パターンのいずれかが異なることとすることができる。

本発明は、第11の観点からすると、エネルギービームによりパターンが形成されたマスクを照明し、前記パターンを投影光学系を介して基板に転写する露光方法であって、本発明の第2の結像特性補正方法により、前記投影光学系の結像特性を補正する結像特性補正工程と；前記結像特性補正工程の後、前記投影光学系を介して前記パターンを前記基板に転写する転写工程と；を含む第2の露光方法である。

これによれば、本発明の第2の結像特性補正方法により、投影光学系の結像特性が補正され、しかる後、エネルギービームによりマスクを照明してそのマスク上のパターンが結像特性が精度良く補正された投影光学系を介して基板上に転写されるので、基板上にはパターンが精度良く転写される。すなわち、高精度な露光が可能となる。これに加え、結像条件の変更に影響を受けることなく、光学系の結像特性を高精度に補正することができるので、結像条件の変更によらず、高精度な露光が可能になる。

本発明は、第12の観点からすると、光学系の結像特性を管理する結像特性管理方法であって、前記光学系によるパターンの投影像を計測する空間像計測を第1のインターバルで実行する空間像計測工程と；前記光学系の波面収差を計測する波面計測を前記第1のインターバルに比べて大きい第2のインターバルで実行する波面計測工程と；を含む結像特性管理方法である。

これによれば、光学系によるパターンの投影像を計測する空間像計測が第1のインターバルで実行され、光学系の波面収差を計測する波面計測が第1のインターバルに比べて大きい第2のインターバルで実行される。すなわち、光学系の結像特性の変化を、簡易に実行できる空間像計測結果に基づいて管理し、一定期間が経ったときに波面収差の計測を行うことで、計測に手間が掛かる波面収差の計測を、高い頻度で行うことなく、光学系の結像特性を高精度に維持

できる。従って、光学系の結像特性を高精度に維持する効率的な結像特性管理が可能となる。

この場合において、直前に行われた前記空間像計測の計測結果と最後に行われた波面収差の計測結果とに基づいて、前記空間像計測結果の変動を予測する予測工程と；前記予測した空間像の計測結果と直後に行われた空間像の計測結果との比較結果に応じて、前記波面収差の計測必要性の有無を判断する判断工程とを更に含み、前記波面収差の計測が必要と判断した場合に、前記波面収差の計測を実行することとすることができる。

本発明は第13の観点からすると、光学系の結像特性を計測する結像特性計測装置であって、前記光学系による所定のパターンの投影像を計測する空間像計測器と；前記光学系の波面収差を計測する波面計測器と；前記空間像計測器による計測結果と、前記波面計測器による計測結果とに基づいて、前記光学系の結像特性を算出する演算装置と；を備える結像特性計測装置である。

これによれば、演算装置により、所定のパターンの光学系による投影像の空間像計測器による計測結果と、光学系の波面収差の波面計測器による計測結果とに基づいて、光学系の結像特性が算出される。ここで、空間像計測器により計測される空間像は、収差の影響を受けた空間像である。従って、所定のパターンの空間像の計測結果に基づいてその結像位置、ひいては結像特性を求めることができるが、その結像特性は収差の影響を受けている。

そこで、演算装置は、空間像の計測結果に含まれる収差の影響を、波面収差の計測結果に基づいて補正することにより、結果的に光学系の結像特性を精度良く算出することができる。すなわち、本発明の結像特性補正装置では、前述した波面の計測結果と空間像の計測結果とを組み合わせることにより、それぞれの計測の欠点を互いに補うことができる。

この場合において、前記波面計測器としては、例えば、前述の第1～第3の波面計測装置のいずれをも用いることができる。

本発明は、第14の観点からすると、本発明の結像特性計測装置と；前記結像特性計測装置による計測結果に基づいて、前記光学系の結像特性を補正する補正装置；とを備える結像特性補正装置である。

これによれば、光学系の結像特性を高精度に計測することが可能な結像特性計測装置による計測結果に基づいて、補正装置により光学系の結像特性が補正されるので、光学系の結像特性を高精度に補正することが可能となる。

本発明は、第15の観点からすると、エネルギービームによりパターンが形成されたマスクを照明し、前記パターンを投影光学系を介して基板に転写する露光装置であって、前記投影光学系の結像特性を補正する本発明の結像特性補正装置と；前記結像特性補正装置が備える前記空間像計測器及び前記波面計測器を搭載可能で、前記基板を保持する基板ステージと；を備える第3の露光装置である。

これによれば、結像特性補正装置を構成する空間像計測器及び波面計測器が、基板を保持する基板ステージに搭載可能となっている。このため、基板ステージ上に搭載された空間像計測器により、所定のパターンの投影光学系による空間像を空間像計測器で計測し、また、波面計測器により投影光学系の波面収差を計測する。また、これらの計測結果に基づいて演算装置により投影光学系の結像特性を算出する。これにより、投影光学系の結像特性が精度良く算出される。そして、この算出結果に基づいて補正装置により投影光学系の結像特性を補正することにより、投影光学系の結像特性が高精度に補正される。従って、この結像特性の補正が行われた状態で、エネルギービームによりマスクを照明してそのマスク上のパターンを投影光学系を介して基板上に転写することにより、基板上にはパターンが精度良く転写される。すなわち、高精度な露光が可能となる。

この場合において、前記波面計測器は、前記基板ステージに対して着脱自在であることとすることができる。

この場合において、前記マスクが載置されるとともに、前記空間像計測器で計測される計測用パターンが形成された基準部材が設けられた、マスクステージを更に備えることとすることができる。

図面の簡単な説明

図 1 は、本発明の第 1 の実施形態に係る露光装置の概略構成を示す図である。

図 2 は、Z チルトステージを示す概略平面図である。

図 3 は、波面計測器を断面して示す図である。

図 4 A～図 4 C は、空間像計測器による計測を説明するための図である。

図 5 A は、波面収差を計測するときの状態を示す図であり、図 5 B は、投影光学系によるパターンの投影像を計測するときの状態を示す図である。

図 6 A は、光学系に収差が存在しない場合においてマイクロレンズアレイから射出される光束を示す図であり、図 6 B は、光学系に収差が存在する場合においてマイクロレンズアレイから射出される光束を示す図である。

図 7 A、図 7 B は波面計測器を用いて計測される収差を示す図である。

図 8 は、本発明の第 2 の実施形態に係る Z チルトステージを示す概略平面図である。

図 9 は、第 2 の実施形態に係る波面計測器を断面して示す図である。

図 10 A、図 10 B は、第 2 の実施形態における投影光学系の波面収差を計測する方法を説明するための図である。

図 11 は、本発明の第 3 の実施形態に係る波面計測器を断面して示す図である。

図 12 A は、第 1 筐体の微小な温度変化をも抑制するための波面計測シーケンスを説明するための図であり、図 12 B は、波面計測器を Z チルトステージに取り付けてから計測を開始するまでの時間を短縮するための計測シーケンス

を説明するための図である。

図13A、図13Bは波面計測器の変形例を示す図である。

図14は、Zチルトステージに対する波面計測器の別の配置例を示す図である。

発明を実施するための最良の形態

《第1の実施形態》

以下、本発明の第1の実施形態を図1～図7に基づいて説明する。

図1には、第1の実施形態に係る露光装置10の概略構成が示されている。この露光装置10は、ステップ・アンド・スキャン方式の走査型露光装置である。

この露光装置10は、光源16及び照明光学系12等を含む照明系、この照明系から射出されるエネルギービームとしての露光光1Lによって照明されるマスクとしてのレチクルRを保持するレチクルステージRST、レチクルRから射出された露光光1Lを基板としてのウエハW上に投射する光学系としての投影光学系PL、ウエハWを保持する基板ステージとしてのウエハステージWST、及びこれらの制御系等を備えている。

光源16としては、例えば波長193nmの紫外パルス光を出力するArFエキシマレーザ光源（あるいは、波長248nmの紫外パルス光を出力するKrFエキシマレーザ光源）が用いられている。この光源16は、実際には、照明光学系12の各構成要素及びレチクルステージRST、投影光学系PL、及びウエハステージWST等から成る露光装置本体が収容された不図示のチャンバが設置されたクリーンルームとは別のクリーン度の低いサービスルームに配置されている。この光源16は、実際には、照明光学系12に、ビームマッチングユニットと呼ばれる光軸調整用の光学系及びリレー光学系（いずれも図示省略）を含む送光光学系を介して接続されている。なお、光源としてF₂レー

ザ光源（出力波長157nm）、その他のパルス光源を用いても良い。

前記照明光学系12は、ビーム整形光学系18、オブティカルインテグレータ（ホモジナイザ）としてのフライアイレンズ22、照明系開口絞り板24、第1リレーレンズ28A、第2リレーレンズ28B、固定レチクルブラインド30A、可動レチクルブラインド30B、光路折り曲げ用のミラーM、及びコンデンサレンズ32等を備えている。

前記ビーム整形光学系18内には、光源16でパルス発光されたレーザビームLBの断面形状を、該レーザビームLBの光路後方に設けられたフライアイレンズ22に効率良く入射するように整形するための、例えばシリンダレンズやビームエキスパンダ（いずれも図示省略）等が含まれている。また、このビーム整形光学系18内には、後述する照明系開口絞り板24による照明開口絞りの設定に応じて、レーザビームの断面積を連続的に変更可能なズーム光学系も含まれている。

前記フライアイレンズ22は、ビーム整形光学系18から出たレーザビームLBの光路上に配置され、レチクルRを均一な照度分布で照明するためにその射出側焦点面に多数の点光源（光源像）から成る面光源、即ち2次光源を形成する。この2次光源から射出されるレーザビームを本明細書においては、「露光光LL」とも呼ぶものとする。なお、オブティカルインテグレータとして、フライアイレンズに代えて、ロッド型（内面反射型）インテグレータ、あるいは回折光学素子などを用いても構わない。

フライアイレンズ22の射出側焦点面あるいはその近傍に、円板状部材から成る照明系開口絞り板24が配置されている。この照明系開口絞り板24には、ほぼ等角度間隔で、例えば通常の円形開口より成る開口絞り（通常照明絞り）、小さな円形開口より成りコヒーレンスファクタである σ 値を小さくするための開口絞り（小 σ 絞り）、輪帯照明用の輪帯状の開口絞り（輪帯絞り）、及び変形光源法用に複数の開口を偏心させて配置して成る変形開口絞り（図1で

は、このうちの２種類の開口絞りのみが図示されている）等が配置されている。この照明系開口絞り板２４は、主制御装置５０により制御されるモータ等の駆動装置４０により回転されるようになっており、これによりいずれかの開口絞りが露光光１Ｌの光路上に選択的に設定される。この開口絞りの選択に応じて、主制御装置５０では、前述したビーム整形光学系１８内部のズームレンズを制御する。これは、例えば、小口径絞りを選択する場合に、それに合わせてレーザービームの断面の大きさを絞ることにより、エネルギーロスを防止する等のためである。

照明系開口絞り板２４から出た露光光１Ｌの光路上に、固定レチクルブラインド３０Ａ及び可動レチクルブラインド３０Ｂを介在させて第１リレーレンズ２８Ａ及び第２リレーレンズ２８Ｂから成るリレー光学系が配置されている。

固定レチクルブラインド３０Ａは、レチクルＲのパターン面に対する共役面から僅かにデフォーカスした面に配置され、レチクルＲ上の照明領域１ＡＲを規定する矩形開口が形成されている。また、この固定レチクルブラインド３０Ａの近傍に走査方向に対応する方向及び走査方向に垂直な非走査方向に対応する方向の位置及び幅が可変の開口部を有する可動レチクルブラインド３０Ｂが配置され、走査露光の開始時及び終了時にその可動レチクルブラインド３０Ｂを介して照明領域１ＡＲを更に制限することによって、不要な部分の露光が防止されるようになっている。

リレー光学系を構成する第２リレーレンズ２８Ｂ後方の露光光１Ｌの光路上には、当該第２リレーレンズ２８Ｂを通過した露光光１ＬをレチクルＲに向けて反射する折り曲げミラーＭが配置され、このミラーＭ後方の露光光１Ｌの光路上にコンデンサレンズ３２が配置されている。

このようにして構成された照明系の作用を簡単に説明すると、光源１６からパルス発光されたレーザービームＬＢは、ビーム整形光学系１８に入射して、ここで後方のフライアイレンズ２２に効率よく入射するようにその断面形状が整

形された後、フライアイレンズ22に入射する。これにより、フライアイレンズ22の射出側焦点面（照明光学系12の瞳面）に2次光源が形成される。この2次光源から射出された露光光1Lは、照明系開口絞り板24上のいずれかの開口絞りを通じた後、第1リレーレンズ28Aを経て固定レチクルブラインド30Aの矩形の開口部及び可動レチクルブラインド30Bを通過した後、第2リレーレンズ28Bを通過してミラーMによって光路が垂直下方に折り曲げられた後、コンデンサレンズ32を経て、レチクルステージRST上に保持されたレチクルR上の照明領域1ARを均一な照度分布で照明する。

前記レチクルステージRST上にレチクルRが載置され、不図示のバキュームチャック等を介して吸着保持されている。レチクルステージRSTは、水平面（XY平面）内で微小駆動可能であるとともに、レチクルステージ駆動部49によって走査方向（ここでは図1の紙面左右方向であるY軸方向とする）に所定ストローク範囲で走査されるようになっている。この走査中のレチクルステージRSTの位置及び回転量は、レチクルステージRST上に固定された移動鏡52Rを介して外部のレーザ干渉計54Rによって所定の分解能、例えば0.5～1nm程度の分解能で計測され、このレーザ干渉計54Rの計測値が主制御装置50に供給されるようになっている。

ここで、実際には、レチクルステージRST上にはY軸方向に直交する反射面を有する移動鏡とX軸方向に直交する反射面を有する移動鏡とが設けられ、これらの移動鏡に対応してレチクルY干渉計とレチクルX干渉計とが設けられているが、図1ではこれらが代表的に移動鏡52R、レーザ干渉計54Rとして示されている。なお、例えば、レチクルステージRSTの端面を鏡面加工して反射面（移動鏡52Rの反射面に相当）を形成しても良い。また、レチクルステージRSTの走査方向（本実施形態ではY軸方向）の位置検出に用いられるX軸方向に伸びた反射面を設けても良いし、この代わりに、少なくとも1つのコーナーキューブ型ミラーを用いても良い。

また、レチクルステージ R S T 上の所定の位置には、後述する空間像計測に用いられる基準部材としてのレチクル・フィデューシャル・マーク板（以下、「R F M 板」と略述する）6 8 が設けられている。この R F M 板 6 8 としては、照明領域 I A R とほぼ同一形状かつほぼ同一面積のガラス基板が用いられ、そのパターン面の所定の位置には、複数の基準マークの他、後述する空間像計測に用いられる計測用マークなどが形成されている。

なお、レチクル R 及び R F M 板 6 8 に用いる材質は、使用する光源によって使い分ける必要がある。すなわち、K r F エキシマレーザ光源や A r F エキシマレーザ光源を光源とする場合は、ホタル石などの他、合成石英などを用いることができるが、F₂ レーザ光源を用いる場合は、ホタル石、フッ素がドーパされた合成石英、あるいは水晶などで形成する必要がある。

前記投影光学系 P L は、例えば両側テレセントリックな縮小系であり、共通の Z 軸方向の光軸を有する複数枚のレンズエレメント 7 0 a、7 0 b、……から構成された屈折光学系が用いられている。この投影光学系 P L の瞳面は、前記フライアイレンズ 2 2 により形成される 2 次光源面と互いに共役な位置関係となっており、レチクルのパターン面とはフーリエ変換の位置関係となっている。また、投影光学系 P L としては、投影倍率 β が例えば $1/4$ 、 $1/5$ 、 $1/6$ などのものが使用されている。このため、前記の如くして、露光光 I L によりレチクル R 上の照明領域 I A R が照明されると、そのレチクル R に形成されたパターンが投影光学系 P L によって投影倍率 β で縮小された像が表面にレジスト（感光剤）が塗布されたウエハ W 上のスリット状の露光領域 I A に投影され転写される。

投影光学系 P L の瞳面近傍には開口絞り 6 9 が設けられている。この開口絞り 6 9 の開口の大きさは可変となっており、投影光学系 P L の開口数（N. A.）を自在に調整することができる。開口絞り 6 9 としては、ここでは虹彩絞りが用いられ、不図示の絞り駆動機構により開口絞り 6 9 の開口を変更するこ

とにより、投影光学系 PL の開口数 $N.A.$ を所定範囲で連続的に変更することができる。絞り駆動機構は、主制御装置 50 により制御される。開口絞り 69 の開口を通過した回折光が、レチクル R と互いに共役な位置関係に置かれたウエハ W 上での結像に寄与することになる。

上記複数のレンズエレメントのうち、レチクル R に最も近いレンズエレメント 70 a を含む複数のレンズエレメントが独立に駆動可能となっている。例えば、レンズエレメント 70 a は、リング状の支持部材 76 a により支持され、この支持部材 76 a は、伸縮可能な駆動素子、例えばピエゾ素子 74 a, 74 b, 74 c (図面奥側の駆動素子 74 c については不図示) によって、3 点支持されるとともに鏡筒部 76 b と連通されている。上記の駆動素子 74 a, 74 b, 74 c によって、レンズエレメント 70 a の周辺 3 点を独立に、投影光学系 PL の光軸 AX 方向に移動させることができるようになっている。すなわち、レンズエレメント 70 a を 3 つの駆動素子 74 a, 74 b, 74 c の変位量に応じて光軸 AX に沿って平行移動させることができるとともに、光軸 AX と垂直な平面に対して任意に傾斜させることもできる。その他の駆動可能なレンズエレメントもレンズエレメント 70 a と同様の駆動機構を介して、光軸 AX 方向及び傾斜方向に微小駆動可能な構成となっている。本実施形態の場合、レンズエレメント 70 a 等の駆動により、例えばザイデルの 5 収差 (ディストーション、非点収差、コマ収差、球面収差、像面湾曲 (フォーカス)) などを調整できるようになっている。この場合、駆動可能なレンズエレメントの数だけ、独立な結像特性の補正が可能である。

この場合、上記のレンズエレメント 70 a 等を駆動する駆動素子に与えられる電圧が、主制御装置 50 からの指令に基づいて結像特性補正コントローラ 78 によって制御され、これによって駆動素子の変位量が制御されるようになっている。また、結像特性補正コントローラ 78 は、投影光学系 PL の収差を調整するだけでなく、気圧変化、照明光線の吸収などによる投影光学系 PL の

収差変動に対して、収差を一定に保つ働きをも有している。なお、図1中、投影光学系PLの光軸AXとは鏡筒部76bに固定されているレンズエレメント70bその他のレンズエレメント（図示省略）の光軸を指す。

なお、露光光ILとしてKrFエキシマレーザ光やArFエキシマレーザ光を用いる場合には、投影光学系PLを構成する各レンズエレメントとしては合成石英やホタル石等を用いることができるが、F₂レーザ光を用いる場合には、この投影光学系PLに使用されるレンズ等の材質は、全てホタル石等のフッ化物結晶が用いられる。

前記ウエハステージWSTは、XYステージ14と、該XYステージ14上に搭載されたZチルトステージ58とを含んで構成されている。

前記XYステージ14は、ウエハステージ駆動部56によって走査方向であるY軸方向（図1における紙面内左右方向）及びこれに直交するX軸方向（図1における紙面直交方向）に2次元駆動されるようになっている。このXYステージ14上に搭載されたZチルトステージ58上にウエハホルダ25を介してウエハWが真空吸着等により保持されている。Zチルトステージ58は、例えば3つのアクチュエータ（ピエゾ素子又はボイスコイルモータなど）によってウエハWのZ軸方向の位置（フォーカス位置）を調整すると共に、XY平面に対するウエハWの傾斜角を調整する機能を有する。また、Zチルトステージ58の位置は、鏡面加工されたZチルトステージ58の側面を介して外部のレーザ干渉計54Wにより計測され、このレーザ干渉計54Wの計測値が主制御装置50に供給されるようになっている。

ここで、Zチルトステージ58は、図2の平面図に示されるように、上方から見てほぼ正方形の形状を有しており、その-X側及び-Y側の側面に、鏡面加工により反射面55X、55Yがそれぞれ形成され、これに対応してレーザ干渉計は、X軸位置計測用の干渉計54W_x、Y軸位置計測用干渉計54W_yがそれぞれ設けられている。また、Zチルトステージ58の+Y側側面の-X

側端部には、+Y側に所定量突出した凸部51が形成されている。この凸部51の-X側の側面は、前述した反射面55Xの一部を構成している。

なお、前述の反射面55X、55Yに代えて、X軸に直交する反射面を有するX移動鏡と、Y軸に直交する反射面を有するY移動鏡とを設けても良い。X軸位置計測用の干渉計54Wx及びY軸位置計測用干渉計54Wyは測長軸を複数有する多軸干渉計であり、Zチルトステージ58のX、Y位置の他、回転（ヨーイング（Z軸回りの回転である θ_z 回転）、ピッチング（X軸回りの回転である θ_x 回転）、ローリング（Y軸回りの回転である θ_y 回転））も計測可能となっている。従って、以下の説明ではレーザ干渉計54Wx、54Wyによって、Zチルトステージ58のX、Y、 θ_z 、 θ_y 、 θ_x の5自由度方向の位置が計測されるものとする。また、多軸干渉計は45°傾いてZチルトステージ58の反射面を介して、投影光学系PLが載置される架台（不図示）に設置される反射面にレーザビームを照射し、投影光学系PLの光軸方向（Z軸方向）に関する相対位置情報を検出するようにしても良い。

また、Zチルトステージ58の+Y側側面の+X側端部には、投影光学系PLの波面収差を計測するための波面計測装置としての波面計測器80が、ネジ止めあるいはマグネット等を介して取り外し可能に設けられている。この波面計測器80は、露光時には、Zチルトステージ58から取り外され、波面収差計測時に限りZチルトステージ58に取り付けられるものである。なお、波面計測器80の構成等については後述する。

前述の凸部51を設けたのは、図2からも分かるように、波面計測器80をZチルトステージ58に取り付けた際に、波面計測器80の2次元位置のうち、X軸方向の位置を、レーザ干渉計54Wxにより計測できるようにしたものである。これに応じてZチルトステージ58のY軸方向のストロークが長く設定されている。

次に、波面計測器80の構成等について、波面計測器80を断面して示す図

3に基づいて説明する。この図3に示されるように、波面計測器80は、XZ断面がL字状の内部空間を有する筐体62と、該筐体62の内部に所定の位置関係で配置された複数の光学素子から成る受光光学系44と、筐体62の内部の-X側端部に配置された受光部42とを備えている。この波面計測器80としては、ここでは、シャック-ハルトマン(Shack-Hartman)方式の波面計測器が用いられている。

これを更に詳述すると、前記筐体62は、XZ断面L字状の内部空間が形成された中空部材から成り、その最上部(+Z方向端部)には、筐体62の上方からの光が筐体の内部空間に向けて入射するように、平面視円形の開口62aが形成されている(図2参照)。また、この開口62aを下側から覆うようにカバーガラス82が設けられている。カバーガラス82の上面には、クロム等の金属の蒸着により中央部に円形の開口を有する遮光膜が形成され、該遮光膜によって投影光学系PLの波面収差の計測の際に周囲からの不要な光が受光光学系44に入射するのが遮られている。

前記受光光学系44は、筐体62の内部のカバーガラス82の下方に、上から下に順次配置された、対物レンズ64a、リレーレンズ64b、折り曲げミラー39と、該折り曲げミラー39の-X側に順次配置されたコリメータレンズ64c、及びマイクロレンズアレイ66等から構成されている。折り曲げミラー39は、45°で斜設されており、該折り曲げミラー39によって、上方から鉛直下向きに対物レンズ64aに対して入射した光の光路がコリメータレンズ64cに向けて折り曲げられるようになっている。なお、この受光光学系44を構成する各光学部材は、筐体62の壁の内側に不図示の保持部材を介してそれぞれ固定されている。前記マイクロレンズアレイ66は、複数の小さな凸レンズ(レンズエレメント)が光路に対して直交する面内にアレイ状に配置されて構成されている。

前記受光部42は、光を光電変換方式で検出する2次元CCD等から成る受

光素子 40 a と、該受光素子 40 a を駆動する電気回路 40 b とを含む。受光素子 40 a は、対物レンズ 64 a に入射し、マイクロレンズアレイ 66 から射出される光束のすべてを受光するのに十分な面積の受光面を有している。また、前記電気回路 40 b は、その機能上、受光素子 40 a の近傍に配置せざるを得ない回路、例えば電荷転送制御回路等の電気回路である。受光素子 40 a から物理的に切り離すことが可能な電気回路 33 は、筐体 62 から離れた位置に設けられ、電気回路 40 b とフラットケーブルで接続されている。なお、受光部 42 による計測データは電気回路 33 を介して波面計測制御装置 48 に出力されるようになっている（図 1 参照）。

このようにして構成された受光光学系 44 及び受光部 42 等の作用を簡単に説明すると、開口 62 a を介して筐体 62 の内部に入射した光束は、対物レンズ 64 a に上方から入射し、リレーレンズ 64 b を介してミラー 39 に連する。そして、この光束は、ミラー 39 で光路が 90° 折り曲げられ、コリメータレンズ 64 c で平行光束に変換され、マイクロレンズアレイ 66 に入射する。このマイクロレンズアレイ 66 に入射した光束は、マイクロレンズアレイ 66 を構成する各レンズエレメントを介して受光部 42 を構成する受光素子 40 a 上にそれぞれ集光される。そして、受光素子 40 a 上の各集光点に入射した光が受光素子 40 a でそれぞれ光電変換され、該光電変換信号が電気回路 40 b、33 等を介して図 1 の波面計測制御装置 48 に送られ、該波面計測制御装置 48 では、その光電変換信号に基づいて結像位置を算出するようになっている。

図 2 に戻り、Z チルトステージ 58 上の 4 つのコーナーの内、+X 方向端部かつ +Y 方向端部のコーナーには、ウエハ W の露光面と同じ高さの受光面を有し、投影光学系 PL を通過した露光光 IL による投影像を計測するための空間像計測器 59 が設けられている。

この空間像計測器 59 は、図 2 に示されるように、平面視ほぼ円形の円筒状

ハウジングを有し、ハウジングの天井面には、合成石英等から成る受光ガラス 57 が設けられている。受光ガラス 57 の受光面は、十分な大きさでかつ平面度（平坦度）が高く形成されている。これは、空間像計測器 59 は、前述した波面計測器 80 と比べて構造が簡易で、光学系の精度もほとんど要求されないこと、及び小型で Z チルトステージ 58 に対する重量の影響が少なく、取り外しをする必要がないことから、受光ガラス 57 の加工面精度を高く設定することが容易だからである。また、この受光ガラス 57 の上面には、図 4 A に示されるように、クロム等の金属が蒸着されて遮光膜が形成されている。この遮光膜の中央部に、スリット状の開口（開口パターン）57a が形成されている。また、この受光ガラス 57 の下方には、空間像計測器 59 の内部構成を概略的に示す図 4 B に示されるように、集光レンズ 81 と、この集光レンズ 81 の下方に設けられたフォトダイオードあるいはフォトマルチプライヤ等の光センサ 83 とが配置されている。なお、空間像計測器 59 の構成各部の作用等については、空間像計測方法とともに後に詳述する。

図 1 に戻り、本実施形態の露光装置 10 では、主制御装置 50 によってオンオフが制御される光源を有し、投影光学系 PL の結像面に向けて多数のピンホール像またはスリットの像を形成するための結像光束を、光軸 AX に対して斜め方向より照射する照射系 60a と、それらの結像光束のウエハ W 表面での反射光束を受光する受光系 60b とからなる斜入射方式の多点焦点位置検出系（フォーカスセンサ）が設けられている。主制御装置 50 では、受光系 60b 内の図示しない平行平板の反射光束の光軸に対する傾きを制御することにより、投影光学系 PL のフォーカス変動に応じて焦点検出系（60a、60b）にオフセットを与えてそのキャリブレーションを行う。これにより、前述の露光領域 1A 内で投影光学系 PL の像面とウエハ W の表面とがその焦点深度の範囲（幅）内で合致することになる。なお、本実施形態と同様の多点焦点位置検出系（フォーカスセンサ）の詳細な構成は、例えば特開平 6-283403 号公報

及びこれに対応する米国特許第 5, 4 4 8, 3 3 2 号等の開示されている。本国際出願で指定した指定国又は選択した選択国の国内法令が許す限りにおいて、上記公報及び米国特許における開示を援用して本明細書の記載の一部とする。

また、主制御装置 5 0 では、後述する波面収差の計測の際に、焦点検出系 (6 0 a, 6 0 b) を用いて波面計測器 8 0 の Z 位置の計測及び位置合わせを行う。

すなわち、これまでの説明から分かるように、ウエハ干渉計 5 4 W x, 5 4 W y 及び焦点検出系 (6 0 a, 6 0 b) とにより、本発明の位置計測装置が構成されている。

走査露光時等に、主制御装置 5 0 では、受光系 6 0 b からの焦点ずれ信号 (デフォーカス信号)、例えば S カーブ信号に基づいて焦点ずれが零となるように Z チルトステージ 5 8 の Z 位置を不図示の駆動系を介して制御することにより、オートフォーカス (自動焦点合わせ) 及びオートレベリングを実行する。なお、焦点検出系 (6 0 a, 6 0 b) によると、ウエハ W の光軸方向の位置だけではなく、ウエハ W のうねり成分も含めた傾斜分も計測でき、これに基づいてその傾斜分を考慮したウエハ W の傾斜制御 (オートレベリング) が行われる。

また、不図示ではあるが、前記投影光学系 P L の側面には、オフアクシス (off-axis) 方式のアライメント検出系が設けられている。このアライメント検出系としては、ここでは、ウエハ上のレジストを感光させないブロードバンドな検出光束を対象マークに照射し、その対象マークからの反射光により受光面に結像された対象マークの像と不図示の指標の像とを撮像素子 (C C D) 等を用いて撮像し、それらの撮像信号を出力する画像処理方式の F I A (Filed Image Alignment) 系のアライメントセンサが用いられている。このアライメント検出系の出力に基づき、不図示の基準マーク板上の基準マーク、波面計測

器 80 上の位置合わせマーク、及びウエハ上のアライメントマークなどの X、Y 2 次元方向の位置計測を行なうことが可能である。

なお、アライメント検出系としては、FIA 系のみでなく、例えばコヒーレントな検出光を対象マークに照射し、その対象マークから発生する散乱光又は回折光を検出したり、その対象マークから発生する 2 つの回折光（例えば同次数）を干渉させて検出するアライメントセンサを単独であるいは適宜組み合わせ用いることは勿論可能である。

さらに、これも不図示ではあるが、レチクル R の上方に、投影光学系 PL を介してレチクル R 上のレチクルマークと不図示の基準マーク板のマークとを同時に観察するための露光波長を用いた TTR (Through The Reticle) アライメント光学系から成る一対のレチクルアライメント顕微鏡（以下、便宜上「RA 顕微鏡」と呼ぶ）が設けられている。なお、本実施形態では、例えば特開平 7-176468 号公報及びこれに対応する米国特許第 5,646,413 号などに詳細に開示された RA 顕微鏡と同様の構成のものが用いられる。本国際出願で指定した指定国又は選択した選択国の国内法令が許す限りにおいて、上記公報及び米国特許における開示を援用して本明細書の記載の一部とする。

制御系は、図 1 中、制御装置としての主制御装置 50 によって主に構成される。主制御装置 50 は、CPU（中央演算処理装置）、ROM（リード・オンリ・メモリ）、RAM（ランダム・アクセス・メモリ）等から成るいわゆるマイクロコンピュータ（又はワークステーション）を含んで構成される。主制御装置 50 では、上述した種々の制御を行う他、露光動作が的確に行われるように、例えばレチクル R とウエハ W の同期走査、ウエハ W のステッピング、露光タイミング等を制御する。

具体的には、前記主制御装置 50 は、例えば走査露光時には、レチクル R がレチクルステージ RST を介して +Y 方向（又は -Y 方向）に速度 $V_R = V$ で走査されるのに同期して、ウエハステージ WST を介してウエハ W が露光領域

1 Aに対して-Y方向（又は+Y方向）に速度 $V_w = \beta \cdot V$ （ β はレチクルRからウエハWに対する投影倍率）で走査されるように、レーザ干渉計54R、54Wの計測値に基づいてレチクルステージ駆動部49、ウエハステージ駆動部56をそれぞれ介してレチクルステージRST、ウエハステージWSTの位置及び速度をそれぞれ制御する。また、ステッピングの際には、主制御装置50ではレーザ干渉計54Wの計測値に基づいてウエハステージ駆動部56を介してウエハステージWSTの位置を制御する。

また、本実施形態では、主制御装置50は、後述するように、空間像計測器59により計測マーク（マークパターン）の投影像（空間像）の検出を行ったり、波面計測制御装置48を介して波面計測器80を用いて波面収差の計測を行ったり、あるいはそれらの計測結果に基づいて投影光学系PLの結像特性の変動量の演算を行ったり、演算結果に基づいて結像特性補正コントローラ78を介して投影光学系PLの結像特性を調整する等の他、装置全体を統括制御する。

次に、本実施形態の露光装置10における投影光学系PLの波面収差の計測方法について説明する。なお、以下の説明においては、説明の簡略化のため、波面計測器80内の受光光学系44の収差は無視できる程小さいものとする。

まず、通常の露光時には、波面計測器80は、Zチルトステージ58から取り外されているため、波面計測に際しては、オペレータによりZチルトステージ58の側面に対して波面計測器80を取り付ける作業が行われる。この取付けに際しては、波面計測時に波面計測器80が、ウエハステージWST（Zチルトステージ58）の移動ストローク内に収まるように、所定の基準面（ここでは+Y側の面）にボルトあるいはマグネット等を介して固定される。

上記の取付け終了後、オペレータによる計測開始のコマンドの入力に応じて、主制御装置50では、前述のアライメント検出系の下方に波面計測器が位置するように、ウエハステージ駆動部56を介してウエハステージWSTを移動

させる。そして、主制御装置 50 では、アライメント検出系により波面計測器 80 に設けられた不図示の位置合わせマークを検出し、その検出結果とそのときのレーザ干渉計 54 W の計測値とに基づいて位置合わせマークの位置座標を算出し、波面計測器 80 の正確な位置を求める。そして、波面計測器 80 の位置計測後、主制御装置 50 を中心として以下のようにして波面収差の計測が実行される。

a. まず、主制御装置 50 は、不図示のレチクルローダによりピンホールパターンが形成された計測用レチクル R p (以下、適宜「レチクル R p」と略述する) をレチクルステージ R S T 上にロードする (図 5 A 参照)。このレチクル R p は、そのパターン面の照明領域 I A R と同一の領域内の複数点にピンホール (ほぼ理想的な点光源となって球面波を発生するピンホール) が形成された専用のレチクルである。なお、波面収差の計測に際しては、上記の計測用レチクル R p に代えて、前述した R F M 板 68 に複数のピンホールを予め形成し、これを用いても良い。この他、通常のデバイス用レチクルに、同様のピンホールパターンを配置可能な場合には、これを用いても良い。

なお、ここで用いられるレチクル R p には、上面に拡散面を設けるなどして、投影光学系 P L の全ての N. A. を通過する光線の波面を求めることができるように、すなわち、投影光学系 P L の全 N. A. に亘る波面収差が計測されるようになっているものとする。

b. レチクル R p のロード後、主制御装置 50 では、前述の R A 顕微鏡を用いて、レチクル R p に形成されたレチクルアライメントマークを検出し、その検出結果に基づいて、レチクル R p を所定の位置に位置合わせする。これにより、レチクル R p の中心と投影光学系 P L の光軸とがほぼ一致する。

c. この後、主制御装置 50 では、光源 16 に制御情報 T S を与えてレーザ光を発光させる。これにより、照明光学系 12 からの露光光 I L が、レチクル R p に照射される。そして、レチクル R p の複数のピンホールから射出された

光が投影光学系 P L を介して像面上に集光され、ピンホールの像が像面に結像される。

d. 次に、主制御装置 5 0 は、レチクル R p 上のいずれかのピンホール（以下においては、着目するピンホールと呼ぶ）の像が結像する結像点に波面計測器 8 0 の開口 6 2 a のほぼ中心が一致するように、ウエハレーザ干渉計 5 4 W の計測値をモニタしつつ、ウエハステージ駆動部 5 6 を介してウエハステージ W S T を移動する。この際、主制御装置 5 0 では、焦点検出系（6 0 a, 6 0 b）の検出結果に基づいて、ピンホール像が結像される像面に波面計測器 8 0 のカバーガラス 8 2 の上面を一致させるべく、ウエハステージ駆動部 5 6 を介してウエハステージ W S T を Z 軸方向に微少駆動する。これにより、着目するピンホールの像光束がカバーガラス 8 2 の中央の開口を介して受光光学系 4 4 に入射し、受光部 4 2 を構成する受光素子によって受光される。図 5 A には、このようにして波面収差の計測が開始された後の状態が示されている。

これを更に詳述すると、レチクル R p 上の着目するピンホールからは球面波が発生し、この球面波が、投影光学系 P L、及び波面計測器 8 0 の受光光学系 4 4 を構成する対物レンズ 6 4 a、リレーレンズ 6 4 b、ミラー 3 9、コリメータレンズ 6 4 c を介して平行光束となって、マイクロレンズアレイ 6 6 を照射する。これにより、投影光学系 P L の瞳面における波面がマイクロレンズアレイ 6 6 にリレーされ、分割（波面分割）される。そして、このマイクロレンズアレイ 6 6 の各レンズエレメントによってそれぞれの光が受光素子の受光面に集光され、該受光面にピンホールの像がそれぞれ結像される。

このとき、投影光学系 P L が、波面収差の無い理想的な光学系であるならば、投影光学系 P L の瞳面における波面は理想的な波面（ここでは平面）になり、その結果マイクロレンズアレイ 6 6 に入射する平行光束が平面波となり、その波面は理想的な波面となる筈である。この場合、図 6 A に示されるように、マイクロレンズアレイ 6 6 を構成する各レンズエレメントの光軸上の位置にス

ポット像（以下、「スポット」とも呼ぶ）が結像する。

しかるに、投影光学系 PL には通常、波面収差が存在するため、マイクロレンズアレイ 66 に入射する平行光束の波面は理想的な波面からずれ、そのずれ、すなわち波面の理想波面に対する傾きに応じて、図 6 B に示されるように、各スポットの結像位置がマイクロレンズアレイ 66 の各レンズエレメントの光軸上の位置からずれることとなる。この場合、各スポットの基準点（各レンズエレメントの光軸上の位置）からの位置のずれは、波面の傾きに対応している。

d. そして、受光部 42 を構成する受光素子上の各集光点に入射した光（スポット像の光束）が受光素子でそれぞれ光電変換され、該光電変換信号が電気回路 40 b、33 等を介して波面計測制御装置 48 に送られ、該波面計測制御装置 48 では、その光電変換信号に基づいて各スポットの結像位置を算出し、さらに、その算出結果と既知の基準点の位置データとを用いて、位置ずれ（ $\Delta \xi$, $\Delta \eta$ ）を算出して内部のメモリに格納する。このとき、主制御装置 50 から波面計測制御装置 48 に対してそのときのレーザ干渉計 54 W の計測値（ X_i , Y_i ）が供給されている。

e. 上述のようにして、1 つの着目するピンホール像の結像点における波面計測器 80 による、スポット像の位置ずれの計測が終了すると、波面計測制御装置 48 からの通知により、主制御装置 50 では、次のピンホール像の結像点に、波面計測器 80 の開口 62 a のほぼ中心が一致するように、ウエハステージ WST を移動する。この移動が終了すると、前述と同様にして、主制御装置 50 により、光源 16 からレーザ光の発光が行われ、同様にして波面計測制御装置 48 によって各スポットの結像位置が算出される。以後、他のピンホール像の結像点で同様の計測が順次行われる。

このようにして、必要な計測が終了した段階では、波面計測制御装置 48 のメモリには、前述した各ピンホール像の結像点における位置ずれデータ（ $\Delta \xi$

、 $\Delta\eta$) と、各結像点の座標データ (各ピンホール像の結像点における計測を行った際のレーザ干渉計 54W の計測値 (X_j , Y_j)) とが格納されている。

そこで、波面計測制御装置 48 では、メモリ内に格納されたピンホール像の結像点に対応する投影光学系 PL の瞳面における波面の傾きに対応する位置ずれ ($\Delta\epsilon$, $\Delta\eta$) に基づいて、例えば、周知のツェルニケ多項式を用いて、波面を復元する、すなわち波面収差を算出する。なお、この波面収差の算出方法は、周知であるから、詳細な説明は省略するが、位置ずれのみでしか与えられていない波面の傾きをそのまま微分するのは容易ではないため、面形状を級数に展開して、これにフィットすることとしたものである。この場合、級数は直交系 (ツェルニケ多項式) を選ぶこと、ツェルニケ多項式は軸対称な面の展開に適した級数であり、円周方向は三角級数に展開すること、波面を極座標系 (ρ , θ) で表すこと、及び波面の微分が上記の位置ずれとして検出されるので、フィッティングは微係数について、最小自乗法で行うことなどが、効率的な演算のためのポイントとなる。

なお、ツェルニケ多項式のそれぞれの項はディストーション、フォーカス成分、非点収差、コマ収差、球面収差などの各光学収差に対応しており、しかも低次の項はザイデル収差にほぼ対応することが知られている。従って、ツェルニケ多項式を用いることにより、投影光学系 PL の結像性能に起因する各収差を求めることができる。

そして、波面計測制御装置 48 では、算出した投影光学系 PL の波面収差を、主制御装置 50 に供給する。そして、主制御装置 50 では、上記波面計測制御装置 48 から供給された投影光学系 PL 単独の波面収差のデータ、すなわちツェルニケ多項式のそれぞれの項が対応する各光学収差の情報に基づいて、結像特性補正コントローラ 78 に指令を与えて、投影光学系 PL の結像特性、例えば、ディストーション、非点収差、コマ収差、球面収差、像面湾曲 (フォーカス) などを調整する。

以上のような波面収差の計測及びこれに基づく投影光学系 P L の結像特性の微調整は、例えば、露光装置メーカー内で、出荷前に投影光学系 P L の最終的な微調整に際しても行われる。すなわち、投影光学系 P L は、露光装置 1 0 に搭載される前に、ある程度の調整は終了しており、露光装置 1 0 に搭載した後は最後の微調整を行うのみとなっているので、上述したような波面収差の計測及びこれに基づく投影光学系 P L の結像特性の微調整（レンズエレメントの微調整）により最終調整が可能である。その後、波面計測器 8 0 は Z チルトステージ 5 8 から取り外された後、露光装置 1 0 が出荷される。

前述の如く、波面計測器 8 0 は、Z チルトステージ 5 8 の側面に常時設置されているわけではない。従って、本実施形態の露光装置 1 0 では、通常の使用時における投影光学系 P L の結像特性の補正は、Z チルトステージ 5 8 に取り付けられている空間像計測器 5 9 による空間像の計測結果に基づいて、主として行われるようになっている。

次に、空間像計測器 5 9 を用いた空間像の計測方法について説明する。まず、最初に、計測用パターン、ここでは、ラインアンドスペースパターン（以下、「L/S パターン」と略述する）を用いて、その空間像の X Y 面内の投影位置（結像位置）の計測を行う場合について説明する。

まず、主制御装置 5 0 では、レチクルステージ駆動部 4 9 を介してレチクルステージ R S T を図 5 B に示される位置まで移動するとともに、ウエハステージ駆動部 5 6 を介して、Z チルトステージ 5 8 を図 5 B に示される位置の近傍まで移動する。ここで、前述した R F M 板 6 8 には、Y 軸方向に周期性を有する L/S パターンから成る計測用マーク（以下、便宜上「マーク P M」と記述する）を含む複数の計測用マークが所定の位置関係で形成されているものとする。

この状態で、主制御装置 5 0 では、光源 1 6 に制御情報 T S を与えてレーザー光を発光させる。これにより、照明光学系 1 2 からの露光光 I L が、R F M 板

68に照射される。これにより、RFM板68の例えばマークPMで発生する回折光が投影光学系PLを介して像面上に集光され、マークPMの空間像（投影像）PM'が図4Aに示されるように像面に形成される。

次に、主制御装置50では、ウエハステージ駆動部56を介して、Zチルトステージ58を図4Aにおける左方向（図1における-Y方向）に移動することにより、空間像PM'に対して空間像計測器59の開口57aが走査され、いわゆるスリットスキャン方式で空間像PM'が計測される。

この計測中に、受光ガラス57の開口57aを透過した露光光ILが集光レンズ81を通して光センサ83の受光面に到達し、該光センサ83で光電変換が行われる。この光電変換により、光センサ83から例えば図4Cに示されるような光量信号（空間像の像強度信号）が出力される。なお、図4Cの横軸は、Zチルトステージ58のY軸方向位置であり、前述のウエハ干渉計54Wyにより計測される座標である。光センサ83からの光量信号は、主制御装置50に供給される。

主制御装置50では、上記の光量信号を関数フィッティング等して空間像PM'を計測し、その空間像PM'の計測結果に公知のスライス法その他の処理方法を適用して空間像PM'の投影光学系PLの光軸に直交するXY面内の結像位置を求める。ここで、スライス法とは、図4Cのような空間像の像強度信号を所定のスライスレベルでスライスし、像強度信号とスライスレベルとの交点に基づいてマークPMの各ラインのエッジを検出するエッジ検出手法である。

主制御装置50では、前述と同様の手順で、RFM板68上の異なる計測用マークについて空間像の計測、及び結像位置の計測を順次行うことにより、複数の計測用マーク（投影光学系PLの有効投影視野内に対応する上記照明領域LAR内に分布する計測用マーク）の結像位置の情報を得て、その結果に基づいて所定の演算を行うことにより、例えば投影光学系PLの倍率やディストー

ション等の結像特性を求める。なお、かかる空間像計測の結果に基づく投影光学系PLの倍率やディストーション等の演算は、例えば、米国特許第5,841,520号などに詳細に開示されている。本国際出願で指定した指定国又は選択した選択国の国内法令が許す限りにおいて、上記米国特許における開示を援用して本明細書の記載の一部とする。

次に、空間像計測により、投影光学系PLの像面位置（ベストフォーカス位置）を求める方法について、簡単に説明する。この像面位置の検出に際し、主制御装置50では、焦点検出系（60a, 60b）の検出結果に基づいて、Zチルトステージ58のZ位置を所定のステップピッチで変化させながら、上記と同様にしてスリットスキャン方式により計測用マークPMの空間像PM'等を計測する。そして、各Z位置について得られた空間像の像強度信号のうち、例えばコントラストが最大になる像強度信号に対応するZ位置を像面位置とする。また、主制御装置50では、かかる像面位置の計測を、異なる計測用マークについて繰り返し行うことで、各計測用マークに対応する点の像面位置を求めることができる。ここで、各点の像面位置の計測に際し、焦点検出系（60a, 60b）の検出点（計測点）と計測用マークの結像点とが一致しない場合には、焦点検出系（60a, 60b）の計測点間に像面計測点（ポイント）が設定された際に、その点における波面計測器80のZ軸方向位置を隣接する計測点における計測結果に基づく補間計算で正確に求めることにより、任意の点における像面を求めることができる。このためには、波面計測器80の表面（例えばカバーガラス82）が十分な平面度を有する面となっており、波面計測器80の表面の傾斜成分（レベリング）が正確に把握されていることが前提となる。なお、補間計算を行わない場合、すなわち、波面計測器80が波面計測のみを目的とする場合には、上記の平面度や傾斜成分を考慮する必要はない。

また、主制御装置50では、このようにして得られた各点についての像面位

置を最小自乗法などを適用して近似曲面を求めることにより、像面湾曲をも求めることができる。

これまでの説明から容易に想像されるように、空間像計測器 59 を構成する集光レンズ 81 は単に光を集めるだけのものであり、また、光センサ 83 も単に光量を測定するだけのものであるから、波面計測器 80 を構成する受光光学系 44、及び受光部 42 を構成する受光素子に比べ精度、大きさ、安定性ともに簡易的であるので、全露光装置に搭載することが可能である。

主制御装置 50 では、通常使用時、具体的には連続運転中などは、上述のようにして、空間像計測器 59 を用いて、ディストーション（倍率を含む）、コマ収差、球面収差、像面等の収差（低次収差）を、例えばロット先頭のウエハの露光の度毎、あるいは 1 日に 1 回などというように、定期的な間隔で計測し、その計測結果に基づき、必要に応じて結像特性補正コントローラ 78 に指令を与えて、投影光学系 PL の結像特性、具体的には上記の低次収差を調整する。

ところで、空間像計測器 59 は、パターンの像の結像位置を直接的に計測するものであり、空間像計測器 59 で計測される結像位置は、投影光学系 PL の複数の収差による複合的な影響を受けた空間像 PM' から求められるものである。また、一般に、照明光学系 12 内の照明系開口絞り板 24 等によって設定された照明条件が異なれば、空間像計測器 59 を用いた空間像計測結果は異なる。これは、例えば照明系開口絞り板 24 の開口絞りの設定が異なれば、照明光学系 12 の瞳面における光源面の形状が異なり、該光源面からの照明光で照明される RFM 板 68 上の計測用パターンから発生する回折光が投影光学系 PL 内を通る光路が、光源面の形状に応じて異なるためである。すなわち、投影光学系 PL の一部を通過した光線のみが結像に寄与し、この結像に寄与する光線が光源面の形状によって異なり、しかも実際の投影光学系 PL には、必ず収差が存在するためである。同様に、投影光学系 PL の N. A. 絞り 69 の開口

の変更や、RFM板6.8上又はレチクル上のパターンの変更等により結像条件が変更される場合には、同様に空間像の計測結果が異なることになる。

ここで、例えば、図7Aに示されるように投影光学系PLにコマ収差がある場合を考えてみる。この場合、結像条件が異なると、上述した理由により、空間像計測では結像位置が異なって計測される。一方、投影光学系PLのディストーションが異なれば、図7A及び前述の説明から明らかなように、空間像計測では結像位置が異なって計測される。従って、空間像計測による結像位置計測だけでは、コマ収差とディストーションが分離できないこととなる。

また、例えば、図7Bに示されるように投影光学系PLに球面収差がある場合を考えてみる。この場合、結像条件が異なると空間像計測では光軸方向の結像位置（像面）が異なって計測される。一方、投影光学系PLの球面収差が異なると、図7Bからも明らかなように、空間像計測では光軸方向の結像位置が異なって計測される。従って、空間像計測だけでは、像面湾曲成分と球面収差成分とを区別することが困難である。

上述したような種々の理由から、空間像計測結果のみに基づいて投影光学系PLの結像特性を管理する場合には、結像条件が変更される度毎に、空間像計測を行い、その計測結果に基づいて投影光学系PLの結像特性を調整することが必要となる。そこで、本実施形態では、波面収差計測と空間像計測とを併用することにより、空間像計測による収差成分を区別可能にし、さらに、上述した結像条件の変更の度毎の空間像計測を不要としている。以下、この点について説明する。

まず、オペレータによりZチルトステージ5.8の側面に対して波面計測器80を取り付ける作業が行われる。この取付け終了後、オペレータによる計測開始のコマンドの入力に応じて、主制御装置50により、前述した手順で、波面収差の計測が行われる。これにより、前述したように、投影光学系PLの全NAに亘る波面収差が計測され、その計測結果が、主制御装置50内のメモ

りに記憶される。

しかる後（あるいは所定時間経過後）、主制御装置 50 は、オペレータが予め設定した露光条件の設定ファイル（プロセスプログラムとも呼ばれる）の設定に応じて、照明光学系 12 内の照明系開口絞り板 24 の開口絞りを選択して照明条件の設定を行い、N. A. 絞り 69 を調整することにより投影光学系 PL の開口数を設定し、また、転写対象のレチクル又はパターンとして最適なものを選択設定する。すなわち、主制御装置 50 では、このようにしてオペレータの設定した結像条件の設定を行う。

上記の照明条件、開口数の設定により、投影光学系 PL の内部を通過する光線の光路が異なる。さらに、レチクルのパターン（パターンの形状、あるいは位相シフトの有無、種類等）により発生する回折光が異なるため、これらの組み合わせで投影光学系内 PL 内を通過する光線の光路が決定する。

主制御装置 50 では、その結像条件の設定の下で、ウエハステージ WST 上の空間像計測器 59 を用いて、前述した手順で空間像計測を実行し、その計測結果をメモリ内に記憶する。

ここで、再度、投影光学系 PL にコマ収差がある場合を考える。この場合には、投影光学系 PL の全 N. A. に渡る波面収差が予め計測され、その計測結果にはコマ収差が含まれている。従って、コマ収差の量は、その波面計測結果、すなわちツェルニケ多項式の各項のうち、コマ収差成分の項に基づいて空間像計測条件及びその計測結果とは無関係に、すなわち結像条件とは無関係に精度良く求められている。従って、主制御装置 50 では、波面計測結果と上記の空間像の計測結果とにより、コマ収差成分とディストーション成分とを分離して、両成分を精度良く算出することができる。

同様に、投影光学系 PL に球面収差がある場合にも、球面収差は、波面計測結果、すなわちツェルニケ多項式の各項のうち球面収差成分の項から、結像条件とは無関係に精度良く求められているので、主制御装置 50 では、波面計測

結果と上記の空間像の計測結果とにより、像面湾曲成分と球面収差成分とを分離して、両成分を精度良く算出することができる。

従って、主制御装置 50 では、以上のようにして算出した投影光学系 PL の結像特性（各種収差）に基づいて、結像特性補正コントローラ 78 を介して、投影光学系 PL 内の各レンズエレメントを上下動させることにより、投影光学系 PL の結像特性を高精度に調整することができる。

また、この場合、上記の波面計測の結果として、投影光学系 PL の全 N、A に亘る波面収差が予め計測されているので、主制御装置 50 では、オペレータの指示あるいはプロセスプログラムの設定に従って結像条件を変更した場合であっても、メモリ内に記憶されている上記の空間像の計測結果（結像条件の変更前の空間像の計測結果）と波面収差の計測結果とに基づいて、その結像条件の変更後における空間像、すなわち、パターンの結像状態（及びそれに基づく投影光学系 PL の結像特性（諸収差））を計算により求める（推測する）ことができる。従って、主制御装置 50 では、その結像条件の変更後における投影光学系 PL の諸収差に基づいてディストーション等の収差が最小となるように、結像特性補正コントローラ 78 を介して、投影光学系 PL 内の各レンズエレメントを上下動させることにより、投影光学系 PL の結像特性を高精度に調整することができる。

また、投影光学系 PL の結像特性の調整は、投影光学系 PL 内のレンズエレメントを移動させる他、これに代えて、あるいはこれに加えて、例えば主制御装置 50 が、ウエハ W 及びレチクル R の少なくとも一方をウエハステージ駆動部 56、レチクルステージ駆動部 49 を介して光軸方向に移動させたり、あるいは光軸に対して傾斜させたりすることによっても行うことができる。さらに、上記各動作に代えて、あるいは上記各動作に加えて、主制御装置 50 あるいは結像特性補正コントローラ 78 が、光源 16 から出力されるレーザ光 LB（露光光 I L）の波長をシフトさせることによっても、投影光学系 PL の結像

特性の調整は可能である。

以上説明した波面収差計測と空間像計測とを併用する方法によると、結像条件の変更の度毎に、空間像の計測を行うことなく、しかも、結像条件の変更に影響を受けることなく、投影光学系PLの結像特性を精度良く調整することが可能となる。また、一つの結像条件下で、十分繰り返して空間像計測を行ってその平均値等を用いて空間像を求めておくことにより、平均化効果により計測精度が向上し、各回の計測結果に含まれる誤差も低減される。

ところで、投影光学系PLは、露光装置製造時に一度調整を行えば、長期に渡って安定的に使用することができることが望ましく、そのように設計・製造が行われている。しかし、製造時の応力が徐々に解放されたり、工場の用力検査時に空調を停止する等に起因する温度変動及び、装置の振動によって、長期的に見ると結像特性が変化する場合がある。従って、例えば波面収差等の結像特性を頻繁に計測して問題とならないうちに結像特性の調整を行うことが望ましい。

しかし、波面計測器80は、上述のようにZチルトステージ58の側面に常時設けられているわけではないため、頻繁に波面計測を行うことは困難である。一方、空間像計測器は常時Zチルトステージ58上に固定されており、また、空間像計測に用いる計測用パターンが形成されたRFM板68も常設されているので、頻繁な空間像計測は可能である。

本実施形態の露光装置10では、かかる点を考慮して、主制御装置50では、次のようにして投影光学系PLの結像特性の管理を行っている。以下、この結像特性管理方法について説明する。

すなわち、主制御装置50では、通常の使用状態、例えば連続運転中には、例えばロットの先頭のウエハの露光開始直前毎、あるいは1日1回などの比較的高い頻度で、Zチルトステージ58に常設されている空間像計測器59を用いて、前述した手順で空間像計測を実行し、この計測結果に基づいて、投影光

学系 PL の結像特性の変化を監視し、必要に応じてその空間像の計測結果に基づいて投影光学系 PL の結像特性を補正する。この程度の頻度で空間像計測を行えば、投影光学系 PL の結像特性が変化したかどうかの判断を行うのには十分である。また、倍率、ディストーション、像面湾曲等の空間像計測器で精度良く計れる収差は、低次でより変化しやすいので空間像計測器 59 による空間像計測結果のみに基づいて補正しても、問題が無い場合が多い。

但し、結像特性の変動の積算値がある一定の値を超えた場合には、空間像の計測結果のみに基づいて十分な結像特性の補正が困難となる可能性がある。そこで、主制御装置 50 では、計測された結像特性の変動の積算値が、ある一定の値を超えた場合に、不図示の表示装置にその旨を表示し、オペレータに波面収差の計測を促す。これにより、オペレータにより波面計測器 80 が Z チルトステージ 58 の側面に取り付けられ、前述のようにして波面収差の計測が実行される。主制御装置 50 では、波面収差の計測結果に基づいて投影光学系 PL の結像特性を補正（調整）する。この場合において、万一、補正が不可能な場合には、例えば、その旨を不図示の表示装置に表示することとしても良い。これにより、オペレータは、投影光学系 PL の結像特性が異常であることを認識し、その後の適切な対応が可能となる。

また、例えば、前述した結像条件の変更を行う場合などには、主制御装置 50 では、直前に行われた空間像計測の計測結果と最後に行われた（前回行われた）波面収差の計測結果とに基づいて、すなわち空間像計測で求められる収差成分と、波面計測で求められた上記収差成分と同一の収差成分（ツェルニケ多項式の項）とを比較することで、その結像条件の変更後の空間像の計測結果を予測する。そして、主制御装置 50 では、結像条件の変更を行い、その変更直後に空間像の計測を実行し、その空間像の計測結果と予測した空間像の計測結果との比較を行い、これら両者の誤差が許容値を超えている場合に、不図示の表示装置にその旨を表示し、オペレータに波面収差の計測を促す。

このようにして、主制御装置 50 により、投影光学系 PL の結像特性の管理が行われるので、投影光学系 PL の結像特性を精度良く維持することができるとともに、波面収差の計測に伴う装置のダウンタイムを極力抑えることができる。

なお、波面収差の計測のタイミングとしては、定期的に行うこととしても良く、例えば半年、あるいは 1 年に 1 回の保守のときに行うこととしても良い。

これまでの説明から明らかなように、本実施形態では、主制御装置 50 によって演算装置が構成され、結像特性補正コントローラ 78 によって補正装置が構成されている。また、主制御装置 50、波面計測制御装置 48、空間像計測器 59、及び波面計測器 80 等を含んで結像特性計測装置が構成され、この結像特性計測装置と結像特性補正コントローラ 78 とによって結像特性補正装置が構成されている。

以上、詳細に説明したように、本実施形態の露光装置 10 によると、主制御装置 50 により、計測用パターンの投影光学系 PL による投影像 PM' を空間像計測器 59 を用いて計測した結果と、投影光学系 PL の波面収差を波面計測器 80 を用いて計測した結果とに基づいて、投影光学系 PL の結像特性が算出される。この際に、主制御装置 50 では、空間像の計測結果に含まれる収差の影響を、波面収差の計測結果に基づいて補正することにより、投影光学系 PL の結像特性を精度良く算出することができる。

また、上記のようにして高精度に計測された投影光学系 PL の結像特性に基づいて、主制御装置 50 により結像特性補正コントローラ 78 を介して投影光学系 PL の結像特性が補正されるので、投影光学系 PL の結像特性を高精度に補正することが可能となる。

また、本実施形態に係る露光装置 10 によると、露光の際には、上記のようにして投影光学系 PL の結像特性の補正が精度良く行われた状態で、前述した走査露光が行われ、露光光 1 L によりレチクル R を照明してそのレチクル R 上

のパターンが投影光学系 P L を介してウエハ W 上に転写される。従って、ウエハ W 上にはパターンが精度良く転写される。すなわち、高精度な露光が可能となる。

なお、上記実施形態では、説明の簡略化のため、波面計測器 8 0 内の受光光学系 4 4 の収差は無視できる程小さいものとした。しかしながら、かかる収差でさえ無視できない精度高い結像特性の計測が要請される場合には、受光光学系 4 4 単独の波面収差を計測する必要があるが生じる。かかる観点からなされたのが、次の第 2 の実施形態である。

《第 2 の実施形態》

次に、本発明の第 2 の実施形態を、図 8 ～ 図 1 0 B に基づいて説明する。ここで、前述した第 1 の実施形態と同一若しくは同等の構成部分については、同一の符号を用いるとともに、その説明を簡略し若しくは省略するものとする。

この第 2 の実施形態は、波面計測器の構成及びこれに応じて波面収差の計測方法などが前述した第 1 の実施形態と相違するのみである。従って、以下では、かかる相違点を中心として、説明する。

図 8 には、本第 2 の実施形態に係る波面計測装置としての波面計測器 8 0 ' が装着された Z チルトステージ 5 8 の平面図が示されている。また、図 9 には、波面計測器 8 0 ' の断面図が示されている。

図 9 に示されるように、波面計測器 8 0 ' は、X Z 断面が L 字状の内部空間を有する第 1 筐体 6 2 A と、該第 1 筐体 6 2 A の内部に所定の位置関係で配置された複数の光学素子から成る受光光学系 4 4 と、第 1 筐体 6 2 A の + Y 側端部に固定された断熱部材 3 8 と、該断熱部材 3 8 の + Y 側に接続された第 2 筐体 6 2 B と、該第 2 筐体 6 2 B の内部に設けられた受光部 4 2 とを備えている。

この場合、第 1 筐体 6 2 A と第 2 筐体 6 2 B と断熱部材 3 8 とによって、波面計測器 8 0 ' の筐体 6 2 ' が構成されている。この波面計測器 8 0 ' は、前述

の波面計測器 80 と同様のシャック-ハルトマン (Shack-Hartman) 方式の波面計測器である。

これを更に詳述すると、前記第 1 筐体 62 A は、L 字状の筒部材から成り、その最上部 (+Z 方向端部) には、第 1 筐体 62 A の上方からの光が筐体内部に入射するように、平面視円形 (図 8 参照) の開口 62 a' が形成されている。また、この開口 62 a' を筒部内側から閉塞するように前述と同様に遮光膜が形成されたカバーガラス 28 が設けられている。

また、カバーガラス 28 上方の第 1 筐体 62 A の上面には、開口 62 a' を覆うような状態で着脱自在のピンホールマスク PHM が装着されている。このピンホールマスク PHM は、実際には、前述の波面計測制御装置 48 によって制御される不図示のスライド機構によって着脱されるようになっている。なお、スライド機構に代えてピンホールマスク PHM をカバーガラス 28 上方の第 1 筐体 62 A の上面に着脱する回転機構、その他の機構を設けても良い。ここで、ピンホールマスク PHM のパターン面 (下面) には、上方から光が照射された場合に、ほぼ理想的な点光源となって球面波を発生するピンホールが形成されている。本実施形態では、このピンホールマスク PHM は、後述するキャリブレーションの際に用いられるものである。

前記受光光学系 44 は、第 1 筐体 62 A の内部に、前述の第 1 の実施形態と同様の位置関係で配置された対物レンズ 64 a、リレーレンズ 64 b、折り曲げミラー 39、コリメータレンズ 64 c、及びマイクロレンズアレイ 66 から構成されている。なお、この受光光学系 44 を構成する各光学部材は、第 1 筐体 62 A の壁の内側に不図示の保持部材を介してそれぞれ固定されている。

前記断熱部材 38 としては、樹脂、セラミック等から成る環状のものが用いられている。この断熱部材 38 の形状は、第 1 筐体 62 A の断面形状及び第 2 筐体 62 B の断面形状に対応している。

前記第 2 筐体 62 B は、有底筒状部材から成り、前記第 1 筐体 62 A の +Y

側に断熱部材 3 8 を介して接続されている。この第 2 筐体 6 4 の内部には、受光部 4 2 が設けられている。この場合も、受光素子 4 0 a から物理的に切り離すことが可能な電気回路 3 3 は、第 2 筐体 6 2 B から離れた位置に設けられ、電気回路 4 2 b とフラットケーブルで接続されている。なお、受光部 4 2 による計測データは電気回路 3 3 を介して前述の波面計測制御装置 4 8 に出力されるようになっている。

更に、第 1 筐体 6 2 の外面の上側には、図 9 に示されるように、遮熱部としての遮熱板 1 4 4 が、第 2 筐体 6 2 B の上方を覆う状態で取り付け部材 4 5 を介して固定されている。この遮熱板 1 4 4 としては、断熱部材 3 8 と同様に、樹脂、セラミック等からなる板状のものが用いられている。なお、この遮熱板 1 4 4 を、筐体 6 2' の外周部をほぼ全周にわたって覆うような構成とすることも可能である。この他、筐体 6 2' の全体、あるいは一部、例えば第 2 筐体 6 2 B、あるいはその一部（受光部 4 2 の上方部）を、樹脂、セラミック等の断熱性の素材により形成しても良い。

上述のようにして構成された受光光学系 4 4 及び受光素子 4 0 によると、開口 6 2 a' を介して第 1 筐体 6 2 A の内部に入射した光束は、対物レンズ 6 4 a、リレーレンズ 6 4 b、ミラー 3 9 を順次介してコリメータレンズ 6 4 c に入射し、該コリメータレンズ 6 4 c で平行光束に変換され、マイクロレンズアレイ 6 6 に入射する。このマイクロレンズアレイ 6 6 に入射した光束は、マイクロレンズアレイ 6 6 を構成する各レンズエレメントを介して受光素子 4 0 a 上にそれぞれ集光される。そして、受光素子 4 0 a 上の各集光点に入射した光が受光素子 4 0 a でそれぞれ光電変換され、該光電変換信号が電気回路 4 0 b、3 3 等を介して波面計測制御装置 4 8 に送られ、該波面計測制御装置 4 8 では、前述と同様にその光電変換信号に基づいて結像位置を算出する。

すなわち、本実施形態では、波面計測器 8 0' が、ピンホールマスク PHM、断熱材 3 8、遮熱板 1 4 4 を備えている点が前述の第 1 の実施形態に係る波

面計測器 80 と異なり、波面計測器のその他の構成部分、及び露光装置の構成などは第 1 の実施形態と同様になっている。

次に、本第 2 の実施形態の露光装置における投影光学系 PL の波面収差の計測方法について説明する。

まず、通常の露光時には、波面計測器 80' は、ウエハステージ WST から取り外されているため、波面計測に際しては、前述と同様にして、オペレータにより Z チルトステージ 58 の側面に対して波面計測器 80' を取り付ける作業が行われる。

上記の取付け終了後、オペレータによる計測開始のコマンドの入力に応じて、主制御装置 50 では、前述のアライメント検出系下方に波面計測器 80' が位置するように、ウエハステージ WST (XY ステージ 14) を移動させる。そして、主制御装置 50 では、アライメント検出系により波面計測器 80' に設けられた不図示の位置合わせマークを検出し、その検出結果とそのときのレーザ干渉計 54 W の計測値とに基づいて位置合わせマークの位置座標を算出し、波面計測器 80' の正確な位置を求める。そして、波面計測器 80' の位置計測後、主制御装置 50 を中心として以下のようにして波面収差の計測が実行される。

まず、主制御装置 50 では、図 10 A に示されるように、投影光学系 PL の光軸のほぼ真下に波面計測器 80' の開口 62 a' の中心（すなわち、対物レンズ 64 a の光軸とほぼ一致）が位置決めされるように、ウエハステージ WST (XY ステージ 14) を移動させる。

次いで、主制御装置 50 からの指示に応じて、波面計測制御装置 48 が不図示のスライド機構を介して波面計測器 80' にピンホールマスク PHM を装着する。そして、主制御装置 50 では、照明系内の光源 16 からのレーザ光の発光を開始する。この時点では、レチクルステージ RST 上には、レチクルが搭載されていないものとする。

上記のレーザ光の発光開始により、照明系からの露光光 I L が投影光学系 P L を介してピンホールマスク P H M に照射される。このとき、投影光学系 P L は単にピンホールマスク P H M を照明するための光学系として機能する。この露光光 I L の照射により、ピンホールマスク P H M のピンホールから球面波が発生する。そして、この球面波が対物レンズ 6 4 a、リレーレンズ 6 4 b、ミラー 3 9、コリメータレンズ 6 4 c を介して平行光束となって、マイクロレンズアレイ 6 6 を照射する。そして、このマイクロレンズアレイ 6 6 の各レンズエレメントによってそれぞれ光が受光素子 4 0 a の受光面に集光され、該受光面にピンホールの像がそれぞれ結像される。

このとき、受光素子 4 0 a に至る光路の途中に配置された受光光学系 4 4 が、波面収差の無い理想的な光学系であるならば、マイクロレンズアレイ 6 6 に入射する平行光束は平面波であり、その波面は理想的な波面となる筈である。この場合、前述と同様に、マイクロレンズアレイ 6 6 を構成する各レンズエレメントの光軸上の位置にスポットが結像する。

しかるに、受光光学系 4 4 には通常、波面収差が存在するため、マイクロレンズアレイ 6 6 に入射する平行光束の波面は理想的な波面（ここでは平面）からずれ、そのずれ、すなわち波面の理想波面に対する傾きに依じて、各スポットの結像位置がマイクロレンズアレイ 6 6 の各レンズエレメントの光軸上の位置からずれる。この場合、各スポットの基準点（各レンズエレメントの光軸上の位置）からの位置のずれは、波面の傾きに対応している。

前述の如く、受光素子 4 0 a 上の各集光点に入射した光（スポット像の光束）が受光素子 4 0 a でそれぞれ光電変換され、該光電変換信号が電気回路 4 0 b、3 3 等を介して波面計測制御装置 4 8 に送られ、該波面計測制御装置 4 8 では、その光電変換信号に基づいて各スポットの結像位置を算出し、さらに、その算出結果と既知の基準点の位置データとを用いて、前述した位置ずれ（ Δx , Δy ）を算出して内部のメモリに格納する。次いで、波面計測制御装置 4

8では、不図示のスライド機構を介して波面計測器80'からピンホールマスクPHMを取り外す(図10B参照)。これにより、波面計測器80'のキャリブレーションが終了し、この終了が波面計測制御装置48から主制御装置50に通知される。

上記の通知を受けると、主制御装置50は、図10Bに示されるように、不図示のレチクルロードにより前述の計測用レチクルRpをレチクルステージRST上にロードする。ここでは、計測専用のレチクルRpを用いるものとする。

レチクルRpのロード後、主制御装置50では、前述のRA顕微鏡を用いて、レチクルRpに形成されたレチクルアライメントマークを検出し、その検出結果に基づいて、レチクルRpを所定の位置に位置合わせする。これにより、レチクルRpの中心と投影光学系PLの光軸とがほぼ一致する。

この後、前述した第1の実施形態中のc. ~ e. と同様の手順で、主制御装置50及び波面計測制御装置48により、レチクルRp上の複数のピンホールのそれぞれについて、波面計測器80'を用い、マイクロレンズアレイ66により受光素子40aの受光面上に結像されるスポット像の位置ずれ量(ΔX_i 、 ΔY_i)の計測が行われる。

このようにして、必要な計測が終了した段階では、波面計測制御装置48のメモリには、前述したキャリブレーション時の位置ずれデータ(Δx 、 Δy)と、各ピンホール像の結像点における位置ずれデータ(ΔX_i 、 ΔY_i)と、各結像点の座標データ(各ピンホール像の結像点における計測を行った際のレーザー干渉計54Wの計測値(X_i 、 Y_i))とが格納されている。

但し、この場合は、波面計測器80'内部の受光光学系44の収差をも問題とするので、マイクロレンズアレイ66に入射する平行光束の波面の理想的な波面からのずれは、分割された投影光学系PLの瞳面における波面の理想的な波面からのずれと、受光光学系44の波面の理想的な波面からのずれとが重ね

合わされたずれとなっている。すなわち、各スポットの基準点（各レンズエレメントの光軸上の位置）からの位置のずれ（ ΔX_i , ΔY_i ）は、分割された投影光学系 P L の瞳面における波面の傾きに対応する位置ずれ（ $\Delta \xi$, $\Delta \eta$ ）と、受光光学系 4 4 の波面の傾きに対応する位置ずれ（ Δx , Δy ）との和になっている。

そこで、波面計測制御装置 4 8 では、メモリ内に格納された位置ずれデータ（ ΔX_i , ΔY_i ）とキャリブレーション時の位置ずれデータ（ Δx , Δy ）との差に基づいて、ピンホール像の結像点に対応する投影光学系 P L の瞳面における波面の傾きに対応する位置ずれ（ $\Delta \xi$, $\Delta \eta$ ）を、各ピンホール像毎に算出する。そして、波面計測制御装置 4 8 では、この位置ずれに基づいて、例えば、前述と同様に、ツェルニケ多項式を用いて、波面を復元する、すなわち波面収差を算出する。

なお、上記の説明では、位置ずれデータ（ ΔX_i , ΔY_i ）とキャリブレーション時の位置ずれデータ（ Δx , Δy ）との差に基づいて、ピンホール像の結像点に対応する投影光学系 P L の瞳面における波面の傾きに対応する位置ずれ（ $\Delta \xi$, $\Delta \eta$ ）を求め、この位置ずれ（ $\Delta \xi$, $\Delta \eta$ ）に基づいて、投影光学系 P L 単独の波面収差を算出することとしたが、これに限らず、位置ずれデータ（ ΔX_i , ΔY_i ）に基づいて、上記と同様に、投影光学系 P L と受光光学系 3 2 との全体の波面収差を算出し、また、キャリブレーション時の位置ずれデータ（ Δx , Δy ）に基づいて受光光学系 4 4 単独の波面収差を算出し、両者の差により、投影光学系 P L 単独の波面収差を算出することとしても良い。

そして、波面計測制御装置 4 8 では、算出した投影光学系 P L 単独の波面収差を、主制御装置 5 0 に供給する。そして、主制御装置 5 0 では、上記波面計測制御装置 4 8 から供給された投影光学系 P L 単独の波面収差のデータ、すなわち、ツェルニケ多項式のそれぞれの項が対応する各光学収差の情報に基づいて、結像特性補正コントローラ 7 8 に指令を与えて、投影光学系 P L の結像特

性、例えば、ディストーション、非点収差、コマ収差、球面収差、像面湾曲（フォーカス）などを調整する。すなわち、これまでの説明から明らかなように、波面計測制御装置 48 及び主制御装置 50 により、本発明の制御装置が構成されている。

本実施形態の露光装置では、露光処理ルーチンに際しては、不図示のレチクル顕微鏡、不図示のオフ・アクシス・アライメント系、及びウエハステージ W S T 上の基準マーク等を用いたレチクルアライメント、ベースライン計測等の準備作業が行われた後に、アライメント検出系を用いたウエハ W のファインアライメント（E G A（エンハンスド・グローバル・アライメント）等）が行われた後、ステップ・アンド・スキャン方式でレチクル R のパターンがウエハ W 上の各ショット領域に順次転写される。すなわち、通常のスキャンング・ステップと同様の手順で、同様の処理が行われるので、詳細説明は省略する。

但し、本第 2 の実施形態の露光装置では、露光条件の設定の際に、上で説明した投影光学系 P L の波面収差の測定及び結像特性の補正が行われる。また、所定枚数のウエハに対する露光が終了する度毎に、上記と同様にして投影光学系 P L 単独の波面収差の計測及び波面収差の補正が行われるようになっている。

ところで、本第 2 の実施形態の露光装置では上述した波面計測の際に、その波面計測精度を向上させるための種々の工夫がなされている。以下、この点について説明する。

すなわち、波面計測器 80' を用いた波面収差の計測、すなわち前述したスポット像の結像位置の位置ずれの計測の際には、受光素子 40 a の光電変換の際の発熱及び電気回路 40 b の発熱により受光部 42 から熱が発生する。しかるに、図 9 に示されるように、本実施形態では、第 1 筐体 62 A と第 2 筐体 62 B との間に断熱部材 38 が設けられているので、該断熱部材 38 によって第 2 筐体 62 B 内の受光部 42 から発生した熱が第 1 筐体 62 A から第 2 筐体 6

2 B 側に伝達されるのが抑制されている。これにより、第1筐体6 2 A及びその内部に設けられた光学部材（6 4 a、6 4 b、6 6等）を保持する不図示の保持部材を介して、それらの光学部材へ熱が伝わるのが抑制され、それらの光学部材の温度変動が抑制されている。従って、温度変化に起因する受光光学系4 4の波面収差の変動が抑制されている。

また、前述した受光部4 2の発熱は、第2筐体6 2 Bからその周囲の空間内の物体に対して輻射熱となって伝達される可能性がある。しかるに、図9に示されるように、本実施形態では、第2筐体6 2 Bの外面上方に取り付け部材4 5を介して遮熱板1 4 4が固定されているので、該遮熱板1 4 4によって、少なくとも第2筐体6 2 B上方の部材に対しては輻射熱が伝達されないようになっている。従って、露光光1 Lを用いた収差計測（図10 B参照）を行う場合に、波面計測器8 0'が投影光学系P Lの直下に位置しても、投影光学系P Lに対する熱の伝達が抑制されるので、投影光学系P Lの収差の変動を抑制することが可能となっている。また、投影光学系P Lの近傍に設けられた、ウエハWのZ方向位置を計測する焦点位置検出系（6 0 a、6 0 b）からの計測ビームに対する温度の影響も抑制されるので、計測ビームの揺らぎによる位置検出精度の低下を抑制することができるようになっている。

また、図9に示されるように、第1筐体6 2 Aの形状がL字状に形成されているので、受光部4 2の上側には受光光学系4 4を構成する光学系は一切存在しない。このため、受光光学系4 4への空気を媒介した熱の伝達が抑制されている。また、計測時においても、熱源である受光部4 2が投影光学系P Lの直下に位置するのを防止することができる。この点においても、投影光学系P Lへ与える熱の影響を低減することができる。

以上のような工夫により、本第2の実施形態では、波面計測器8 0'により、本来の使用時（露光時）とほぼ同様の投影光学系P Lの波面収差を、正確かつ安定して計測することが可能となっている。

また、波面計測器 80' は、ウエハステージ WST (Zチルトステージ 58) に着脱自在となっているので、露光時には、これを取り外すことにより、その分ウエハステージ WST の軽量化を図ることができ、これによりウエハステージの位置制御性の向上が可能である。

従って、本実施形態の露光装置によると、結像特性 (収差) が精度良く調整された投影光学系 PL を用いて、レチクル R のパターンをウエハ W 上の各ショット領域に高精度に転写することが可能となっている。

また、波面計測器 80' は、Zチルトステージ 58 に装着可能であることから、特別な駆動装置等を用意しなくても、波面計測器 80' を XY 平面内で自在に移動することができるとともに、Z 軸方向の位置決めも容易になっている。従って、投影光学系 PL の焦点位置に波面計測器 80' の計測面を合わせることができるとともに、投影光学系 PL の露光エリア (照明領域 IAR に対応する領域) 内の各点の波面収差を計測することが可能となっている。

また、本第 2 の実施形態の露光装置では、前述の第 1 の実施形態と同様に、主制御装置 50 により、計測用パターンの投影光学系 PL による投影像 PM' を空間像計測器 59 を用いて計測した結果と、投影光学系 PL の波面収差を波面計測器 80' を用いて計測した結果とに基づいて、投影光学系 PL の結像特性を算出することができる。この際、主制御装置 50 では、空間像の計測結果に含まれる収差の影響を、波面収差の計測結果に基づいて補正することにより、前述の第 1 の実施形態と比べて投影光学系 PL の結像特性をより精度良く算出することができる。これは、投影光学系 PL の波面収差をより高精度に求めることができるからである。

また、上記のようにして高精度に計測された投影光学系 PL の結像特性に基づいて、主制御装置 50 により結像特性補正コントローラ 78 を介して投影光学系 PL の結像特性が補正することにより、投影光学系 PL の結像特性を高精度に補正することが可能となる。

なお、断熱部材 38 は、前述したように環状のものであるが、その開口部の大きさは、マイクロレンズアレイ 66 によって集光される光束を遮らなければ如何なる形状であっても良い。従って、断熱部材 38 は、上記第 2 の実施形態のように第 1 筐体 62 A と第 2 筐体 62 B との接続部を必ずしも構成する必要はない。例えば第 1 筐体 62 A と第 2 筐体 62 B とから成る筐体、あるいは前述の筐体 62 と同様の単一の筐体の内側あるいは外側から溝を形成し、該溝に断熱部材を設けるようにしても良い。要は、断熱部材は、受光部 42 と受光光学系 44 との間の位置で筐体に固定されていれば良い。

《第 3 の実施形態》

次に、本発明の第 3 の実施形態を図 11、図 12 A 及び図 12 B に基づいて説明する。この第 2 の実施形態は、波面計測器及び波面計測器の使用方法が異なるのみで、その他の部分の構成は前述した第 1 及び第 2 の実施形態と同一であるから、重複説明を回避するため、同一若しくは同等の構成部分については同一の符号を用いるとともにその説明を簡略化し若しくは省略する。

図 11 には、第 3 の実施形態に係る波面計測器 180 を断面し、+Y 方向から見た図が示されている。この図 11 と上記第 2 の実施形態に係る波面計測器 80' を示す図 9 とを比較すると分かるように、波面計測器 180 には、第 1 筐体 62 A 外部の対物レンズ 64 a 及びリレーレンズ 64 b の近傍に設けられ、ケーブルを介して第 1 筐体 62 A から離れた位置に存在する電気回路 33 に接続された第 1 温度センサ 46 a と、第 1 筐体 62 A 外部のコリメータレンズ 64 c 近傍に設けられ、前記第 1 温度センサ 46 a と同様、ケーブルを介して電気回路 33 に接続された第 2 温度センサ 46 b とを備えているところに特徴を有している。また、波面計測器 180 では、断熱部材が省略されている。

前記第 1、第 2 温度センサ 46 a, 46 b は、サーミスタ、抵抗体、あるいは熱伝体等から成り、波面計測器 180 の第 1 筐体 62 の温度を効率良く伝えるように、かつ外気の影響を受けないようにサーマルコンパウンド等で覆われ

た構成となっている。また、これら第1、第2温度センサ46a、46bは、温度に敏感な光学部材（レンズ）の近くにそれぞれ設置されており、これらの温度センサ46a、46bからのデータは、外部の電気回路33を介して波面計測制御装置48（図1参照）へと送られる。

この波面計測器180では、受光部42を構成する電気回路40bに駆動電流が供給されると、受光部42で熱が発生し、その熱が第2筐体62Bを介して第1筐体62Aに伝達される。従って、第1筐体62Aの温度が時間とともに図12Aに示されるような曲線を描くように変化する。そして、このような温度変化が第1、第2温度センサ46a、46bによってそれぞれ計測される。

以下、これら第1、第2温度センサ46a、46bを用いることにより、上記第1筐体62Aの微小な温度変化による計測精度への影響をも抑制することが可能な計測シーケンスについて図12A及び図12Bに基づいて説明する。なお、上述のように本実施形態では、波面計測器180に温度センサが2つ設けられているが、各温度センサの計測値の変化はほぼ同じ挙動を示すことから、以下の説明においては、便宜上、第1温度センサ46a、第2温度センサ46bを纏めて「温度センサ46」として表すものとする。

図12Aに示されるように、時間 t_0 において波面計測器180を構成する電気回路40bに対して電流供給を開始すると、初期温度 T_0 から、実線で示されるように温度が上昇し、この温度変化が温度センサ46で計測される。この温度上昇により波面計測器180を構成する受光光学系44の収差が変化することが問題であるが、前述した第2の実施形態と同様にして受光光学系44単独の波面収差の計測を行うことにより、その影響を相殺することができる。すなわち、受光光学系44単独の波面収差を計測した後、温度変化が十分小さく、波面が殆ど変化しなければ計測誤差にはならない。

このため、図12Aの実線が十分に飽和される領域まで待ってから、前述し

たキャリブレーションを行えば良い。しかし、温度が飽和するまで待つと、待ち時間が長くなる可能性もある。

そこで、図12Aに示されるように、波面が殆ど変化しないと思われる許容温度変化量 ΔT を設定し、温度が ΔT 上昇する毎に受光光学系44単独の波面収差を計測し直す（キャリブレーションする）こととしても良い。また、この図12Aから分かるように、電流を供給開始した直後は、温度が ΔT だけ上昇する時間が短く、キャリブレーションを行うだけの時間を確保することができないので、ある程度温度変化が緩やかになった時間 t_1 （温度 T_1 ）のときに受光光学系単独の波面収差の計測（キャリブレーション）を行った後、前述した投影光学系PLの波面収差の計測を開始する。そして、その計測中に、温度が ΔT 上昇した時間 t_2 で、再度受光光学系単独の波面収差を計測（キャリブレーション）した後、投影光学系PLの波面収差の計測を再び開始する。そして、更に温度が ΔT 上昇した時間 t_3 で更にキャリブレーションを行うこととしている。この方法によると、温度が飽和するまでの時間を待たなくても、キャリブレーションを行うことで比較的高精度な投影光学系PLの波面収差の計測が可能となる。

なお、図12Aに示される時間 $t_0 \sim t_1$ までの時間を短縮することが可能な計測シーケンスを採用することもできる。図12Bには、その計測シーケンスにより計測を行った場合の温度変化が実線にて示されている。

図12Bに示されるように、波面計測器180をZチルトステージ58に取り付ける前に、時間 t_s から波面計測器180の温度がほぼ飽和状態になるまで、受光部を構成する電気回路40bに対して電流を供給しておく。次に、波面計測器180の温度がほぼ飽和状態になった時点で、Zチルトステージ58に波面計測器180がオペレータにより取り付けられるが、この取り付けの際には、実際には波面計測器180からフラットケーブルを一旦はずさなければならぬため、電流の供給が一時ストップされ、図12Bに示されるように温

度がやや低下する。その後、Zチルトステージ58に対する波面計測器180の取り付けが終了した時点(t_0)で、波面計測器180に再度電流を供給する。

すなわち、Zチルトステージ58に対する波面計測器180の取付けが終了したときには、温度センサ46の計測値は温度 T_s となっているので、Zチルトステージ58に波面計測器180を取り付けた後、受光部42に再度電流を供給し、波面収差の計測が可能となるまでには時間($t_0 \sim t_1'$)だけかかる。一方で、Zチルトステージ58に波面計測器180を取り付けた後、はじめて電流の供給を開始した場合(1点鎖線で示されている)には、波面収差の計測が可能となる温度 T_1 となるまでに時間($t_0 \sim t_1$)だけかかる。従って、両者を比べると、先に電流を供給しておくことにより、波面計測器180をZチルトステージ58に取り付けてから波面計測を実行できるまでの時間を短縮することが可能となる。

なお、このようにして、波面計測を実行するまでの時間を短縮した場合にも、図12Aで説明したように、温度が ΔT 変化する毎に、受光光学系44単独の波面収差のキャリブレーションを行うようにすることが望ましい。

以上説明したように、本第3の実施形態に係る波面計測器180は、温度センサ46a、46bを備えていることから、その計測値(温度)に基づいて波面計測のキャリブレーションを行うことにより、より高精度な波面収差計測を行うことが可能となる。また、温度がほぼ飽和状態となる前に計測を行うことができるので、波面計測にかかる時間を短縮することも可能となる。

なお、波面計測器180に設けられる温度センサの個数、位置については、上記実施形態に掲げる場合に限らず、任意であって、各光学部材それぞれの近傍に設けても良いし、第1筐体の何処か1箇所に設けるようにしても良い。

なお、本実施形態では、キャリブレーションの実行を管理する基準として温度センサにより計測される温度の変化量を用いるものとしたが、これに限らず

、一度温度特性を計測した後は、温度センサではなく時間を計測して、時間を基準とした管理をしても良い。

また、本実施形態のようなシーケンスで波面収差の計測を行う場合には、受光光学系44の波面収差の変化が大きくなっても、温度に応じてキャリブレーションを行うことにより、投影光学系PLの波面収差の計測結果に与える影響を小さくすることができるので、本第3の実施形態では、断熱部材を省略したものである。但し、本第3の実施形態でも、断熱部材38を第1筐体と第2筐体の間に設けても構わない。但し、このようにする場合には、図12Bに対応するシーケンスを採用することが、計測時間の短縮という点からは望ましい。

波面計測器180の他の部分、及びその他の部分は、前述した第1、第2の実施形態の露光装置と同様に構成されている。従って、本第3の実施形態によっても、前述した第1、第2の実施形態と同等の効果を得ることができる。

なお、上記各実施形態では、空間像の計測結果、波面収差の計測結果に基づいて、露光の際の投影光学系の結像特性を補正（あるいは調整）する場合について説明したが、これに限らず、例えば波面収差の計測結果を考慮して、レチクルRとウエハWとのいずれかの目標位置にオフセットを与える等により、レチクルRとウエハWとの相対位置を調整しても良く、かかる場合にもレチクルパターンとウエハ上の各ショット領域との重ね合せ精度の向上が可能である。

なお、上記各実施形態では、波面計測器として、シャック-ハルトマン（Shack-Hartman）方式の波面計測器、すなわちマイクロレンズアレイ66を用いた波面計測器を採用したが、本発明がこれに限られるものではなく、図13A、図13Bに示されるような波面計測器を採用することも可能である。なお、図13A、図13Bでは、説明を簡略化するため、光軸を折り曲げず一直線とし、受光部についても受光素子のみが図示されている。また、受光光学系についても実際は複数の光学部材を含むものであるが、単一のレンズとして図示されている。

図13Aには、波面計測器の第1の変形例が示されている。この波面計測器280は、上記各実施形態の波面計測器に採用したマイクロレンズアレイ66に代えて、シェアリング素子66'を採用したところに特徴を有している。この波面計測器280について簡単に説明すると、受光光学系44により、投影光学系PLの瞳面における波面がシェアリング素子66'にリレーされ、シェアリング素子66'により微小にシフトした像が互いに干渉し合い、受光素子40a上に干渉縞が形成される。そして、隣接した波面同士の干渉は、波面の微分量に相当することから、その計測された値を積分することで、波面を再現することが可能である。

また、図13Bには、波面計測器の第2の変形例が示されている。この波面計測器380は、受光光学系44を通過後、複数（図13Bでは2つ）のレンズ66A、66Bから成る拡大レンズ系66''によりピンホール像を結像し、受光素子40a上で計測するものである。この場合、ピンホール像の焦点を微小にずらしながらピンホール像を計測することにより、ピンホール像の点像分布関数（ポイントスプレッドファンクション）が得られるので、これにより波面を求めることが可能となっている。

なお、上記の各波面計測器が採用する方式には、一長一短があり、例えば入手可能な受光素子、光学素子の性能、あるいは波面計測器の大きさ、重量等を考え最適な波面収差計測器を選択すれば良い。いずれも、受光光学系及び受光素子を使う構成であるため、上記実施形態と同様にして高精度な収差計測、収差の調整、ひいては高精度な露光を行うことが可能となる。

なお、波面計測器のZチルトステージ58への取り付け位置についても、上記各実施形態のものに限らず、図14に示されるような配置とすることもできる。すなわち、図2、図8に示されるZチルトステージ58のうちの1つの角を切り落とし、図14に示されるような5角形状とし、新たにできた面に対して波面計測器80（80'、180）を設けるようにしても良く、このよう

な配置とすることにより、図2、図8に示されるように、ストロークを得るためにZチルトステージ58の一部に凸部51を設ける必要が無く、しかもZチルトステージ58、ひいてはウエハステージWSTの小型化が可能となる。

更に、波面計測器の露光装置への取り付け方についても、上記各実施形態にとらわれず、ウエハステージ（Zチルトステージ）に直接設けず、露光装置内にウエハステージとは別の計測用のステージを設置し、これに搭載するようにしても良い。このように計測用のステージを設けることで、各ステージが移動する範囲が大きくなり、装置の床面積（フットプリント）が増えることになるが、波面計測器の取り外し作業が不要となって、調整時間、メンテナンス時間の短縮を図ることができる。また、この計測用のステージとしては、露光用のステージと同様、自ら駆動可能としても良いし、露光用のステージと接続し、必要な時にのみ引っ張られる構成としても良い。更に、計測時に露光用のステージをはずして、波面計測器が設けられたステージと入替えるようにしても良く、この場合には、波面計測器の小型化に対する要求を緩めることができる。

更に、ステージの重量の増加を抑制するため、精度が要求される光学系のみ常時露光用のステージに搭載し、精度が要求されない、又はキャリブレーション可能である受光部のみ計測時に取り付ける方法や、受光部をステージ外部に取付け、空中あるいはファイバで光線をリレーする方法を採用することも可能である。

なお、上記実施形態において、ArFエキシマレーザー光、あるいはF₂レーザー光などの波長200nm～150nmの帯域に属する真空紫外と呼ばれる波長域の光束を露光光として用いる場合には、酸素や有機物（F₂レーザー光の場合には、それ以外に水蒸気、炭化水素ガス等も含む）による吸収が極めて大きいため、露光光が通る光路上の空間中のこれらのガスの濃度を数ppm以下の濃度にまで下げるべく、その光路上の空間の気体を、吸収の少ない、窒素や、ヘリウム等の不活性ガスで置換する（パージする）必要がある。

なお、上記実施形態では、光源としてF₂レーザ、ArFエキシマレーザ、KrFエキシマレーザ等のパルスレーザ光源を用いるものとしたが、これに限らず、Ar₂レーザ光源（出力波長126nm）などの他の真空紫外光源を用いても良い。また、例えば、真空紫外光として上記各光源から出力されるレーザ光に限らず、DFB半導体レーザ又はファイバーレーザから発振される赤外域、又は可視域の単一波長レーザ光を、例えばエルビウム（Er）（又はエルビウムとイッテルビウム（Yb）の両方）がドーパされたファイバーアンプで増幅し、非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換した高調波を用いても良い。

なお、上記実施形態では、ステップ・アンド・スキャン方式等の走査型露光装置に本発明が適用された場合について説明したが、本発明の適用範囲がこれに限定されないことは勿論である。すなわちステップ・アンド・リピート方式の縮小投影露光装置にも本発明は好適に適用できる。

なお、複数のレンズから構成される照明光学系、投影光学系を露光装置本体に組み込み、光学調整をするとともに、多数の機械部品からなるレチクルステージやウエハステージを露光装置本体に取り付けて配線や配管を接続し、更に総合調整（電気調整、動作確認等）をすることにより、上記実施形態の露光装置を製造することができる。なお、露光装置の製造は温度及びクリーン度等が管理されたクリーンルームで行うことが望ましい。

なお、本発明は、半導体製造用の露光装置に限らず、液晶表示素子などを含むディスプレイの製造に用いられる、デバイスパターンをガラスプレート上に転写する露光装置、薄膜磁気ヘッドの製造に用いられるデバイスパターンをセラミックウエハ上に転写する露光装置、及び撮像素子（CCDなど）の製造に用いられる露光装置などにも適用することができる。また、半導体素子などのマイクロデバイスだけでなく、光露光装置、EUV露光装置、X線露光装置、及び電子線露光装置などで使用されるレチクル又はマスクを製造するために、

ガラス基板又はシリコンウエハなどに回路パターンを転写する露光装置にも本発明を適用できる。ここで、DUV（遠紫外）光やVUV（真空紫外）光などを用いる露光装置では一般的に透過型レチクルが用いられ、レチクル基板としては石英ガラス、フッ素がドーパされた石英ガラス、螢石、フッ化マグネシウム、又は水晶などが用いられる。

なお、半導体デバイスは、デバイスの機能・性能設計を行うステップ、この設計ステップに基づいたレチクルを製作するステップ、シリコン材料からウエハを製作するステップ、前述した実施形態の露光装置によりレチクルのパターンをウエハに転写するステップ、デバイス組み立てステップ（ダイシング工程、ボンディング工程、パッケージ工程を含む）、検査ステップ等を経て製造される。

産業上の利用可能性

以上、説明したように、本発明の波面計測装置は、被計測光学系の波面収差の計測に適している。また、本発明の波面計測装置の使用方法は、精度の高い波面収差の計測に適している。また、本発明の結像特性計測方法及び装置は、光学系の結像特性を計測するのに適している。また、本発明の結像特性補正方法及び装置は、光学系の結像特性を補正するのに適している。また、本発明の結像特性管理方法は、効率的な結像特性の管理に適している。また、本発明の露光方法及び装置は、基板上に微細パターンを転写するのに適している。

請 求 の 範 囲

1. 被計測光学系の波面収差を計測する波面計測装置であって、
計測時に前記被計測光学系を通った光が入射する受光光学系と；
該受光光学系を介して前記光を受光する受光素子を含む受光部と；
前記受光光学系と前記受光部とを所定の位置関係で保持する筐体と；
前記受光部と前記受光光学系との間に配置される断熱部材と；を備える波面計測装置。
2. 請求項 1 に記載の波面計測装置において、
前記筐体は、前記受光部からの輻射熱が外部に伝達されるのを防止する遮熱部を有することを特徴とする波面計測装置。
3. 請求項 1 に記載の波面計測装置において、
前記受光光学系を構成する光学素子の近傍の前記筐体に固定された少なくとも 1 つの温度センサと；
前記被計測光学系及び前記受光光学系全体の波面収差の計測を行うとともに、その計測中の前記温度センサの測定結果に基づいて所定のタイミングで前記受光光学系単独の波面収差の計測を実行する制御装置と；を更に備えることを特徴とする波面計測装置。
4. 被計測光学系の波面収差を計測する波面計測装置であって、
計測時に前記被計測光学系を通った光が入射する受光光学系と；
該受光光学系を介して前記光を受光する受光素子を含む受光部と；
前記受光光学系と前記受光部とを所定の位置関係で保持する筐体と；
前記筐体に設けられ、前記受光部からの輻射熱が外部に伝達されるのを防止

する遮熱部と；を備える波面計測装置。

5. 請求項4に記載の波面計測装置において、

前記受光光学系を構成する光学素子の近傍の前記筐体に固定された少なくとも1つの温度センサと；

前記被計測光学系及び前記受光光学系全体の波面収差の計測を行うとともに、その計測中の前記温度センサの測定結果に基づいて所定のタイミングで前記受光光学系単独の波面収差の計測を実行する制御装置と；を更に備えることを特徴とする波面計測装置。

6. 被計測光学系の波面収差を計測する波面計測装置であって、

計測時に前記被計測光学系を通った光が入射する受光光学系と；

該受光光学系を介して前記光を受光する受光素子を含む受光部と；

前記受光光学系と前記受光部とを所定の位置関係で保持する筐体と；

前記筐体に固定された少なくとも1つの温度センサと；

前記被計測光学系及び前記受光光学系全体の波面収差の計測を行うとともに、その計測中の前記温度センサの測定結果に基づいて所定のタイミングで前記受光光学系単独の波面収差の計測を実行する制御装置と；を備える波面計測装置。

7. 請求項1～6のいずれか一項に記載の波面計測装置の使用方法であって

波面計測に先立って、前記受光部の温度をほぼ飽和状態にする工程を含む波面計測装置の使用方法。

8. マスクのパターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光装置であ

って、

請求項 1 ～ 6 のいずれか一項に記載の波面計測装置を構成する前記筐体が着脱自在に装着され、前記基板が載置される基板ステージを備える露光装置。

9. マスクのパターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光装置であって、

請求項 2、4、5 のいずれか一項に記載の波面計測装置を構成する前記筐体が前記遮熱部を前記投影光学系側に向けた状態で着脱可能であるとともに、前記基板が載置される基板ステージと；

前記基板ステージに装着された前記筐体の位置を計測する位置計測装置と；
を備える露光装置。

10. 光学系の結像特性を計測する結像特性計測方法であって、

前記光学系による所定のパターンの投影像を計測する第 1 工程と；

前記光学系の波面収差を計測する第 2 工程と；

前記第 1 及び第 2 工程の計測結果に基づいて、前記光学系の結像特性を算出する第 3 工程と；を含む結像特性計測方法。

11. 請求項 10 に記載の結像特性計測方法において、

前記第 3 工程では、前記波面収差の計測結果に基づいて、前記投影像の計測結果に含まれる、異なる結像特性成分を分離することを特徴とする結像特性計測方法。

12. 請求項 11 に記載の結像特性計測方法において、

前記分離される結像特性成分には、歪曲収差成分とコマ収差成分とが含まれることを特徴とする結像特性計測方法。

13. 請求項11に記載の結像特性計測方法において、
前記分離される結像特性成分には、像面湾曲成分と球面収差成分とが含まれることを特徴とする結像特性計測方法。
14. 光学系の結像特性を補正する結像特性補正方法であって、
前記光学系の結像特性を、請求項10～13のいずれか一項に記載の結像特性計測方法により計測する計測工程と；
前記計測工程における計測結果に基づいて、前記光学系の結像特性を補正する補正工程と；を含む結像特性補正方法。
15. エネルギービームによりパターンが形成されたマスクを照明し、前記パターンを投影光学系を介して基板に転写する露光方法であって、
請求項14に記載の結像特性補正方法により、前記投影光学系の結像特性を補正する結像特性補正工程と；
前記結像特性補正工程の後に、前記投影光学系を介して前記パターンを前記基板に転写する転写工程と；を含む露光方法。
16. 光学系の結像特性を補正する結像特性補正方法であって、
前記光学系による所定のパターンの投影像を、第1の結像条件の下で計測する第1計測工程と；
前記光学系の波面収差の計測を行う第2計測工程と；
前記第1の結像条件とは異なる第2の結像条件下におけるパターンの投影像を、前記第2計測工程の計測結果に基づいて推測し、該推測結果に応じて、前記第2の結像条件下における前記光学系の結像特性を補正する補正工程と；を含む結像特性補正方法。

17. 請求項16に記載の結像特性補正方法において、

前記第1の結像条件と前記第2の結像条件とでは、照明条件、前記光学系の開口数、及び前記パターンのいずれかが異なることを特徴とする結像特性補正方法。

18. エネルギービームによりパターンが形成されたマスクを照明し、前記パターンを投影光学系を介して基板に転写する露光方法であって、

請求項16又は17に記載の結像特性補正方法により、前記投影光学系の結像特性を補正する結像特性補正工程と；

前記結像特性補正工程の後、前記投影光学系を介して前記パターンを前記基板に転写する転写工程と；を含む露光方法。

19. 光学系の結像特性を管理する結像特性管理方法であって、

前記光学系によるパターンの投影像を計測する空間像計測を第1のインターバルで実行する空間像計測工程と；

前記光学系の波面収差を計測する波面計測を前記第1のインターバルに比べて大きい第2のインターバルで実行する波面計測工程と；を含む結像特性管理方法。

20. 請求項19に記載の結像特性管理方法において、

直前に行われた前記空間像計測の計測結果と最後に行われた波面収差の計測結果とに基づいて、前記空間像計測結果の変動を予測する予測工程と；

前記予測した空間像の計測結果と直後に行われた空間像の計測結果との比較結果に応じて、前記波面収差の計測必要性の有無を判断する判断工程とを更に含み、

前記波面収差の計測が必要と判断した場合に、前記波面収差の計測を実行することを特徴とする結像特性管理方法。

21. 光学系の結像特性を計測する結像特性計測装置であって、
前記光学系による所定のパターンの投影像を計測する空間像計測器と；
前記光学系の波面収差を計測する波面計測器と；
前記空間像計測器による計測結果と、前記波面計測器による計測結果とに基づいて、前記光学系の結像特性を算出する演算装置と；を備える結像特性計測装置。

22. 請求項21に記載の結像特性計測装置において、
前記波面計測器は、
計測時に前記光学系を通った光が入射する受光光学系と；
該受光光学系を介して前記光を受光する受光素子を含む受光部と；
前記受光光学系と前記受光部とを所定の位置関係で保持する筐体と；
前記受光部と前記受光光学系との間に配置される断熱部材と；を有することを特徴とする結像特性計測装置。

23. 請求項21に記載の結像特性計測装置において、
前記波面計測器は、
計測時に前記被計測光学系を通った光が入射する受光光学系と；
該受光光学系を介して前記光を受光する受光素子を含む受光部と；
前記受光光学系と前記受光部とを所定の位置関係で保持する筐体と；
前記筐体に設けられ、前記受光部からの輻射熱が外部に伝達されるのを防止する遮熱部と；を有することを特徴とする結像特性計測装置。

24. 請求項21に記載の結像特性計測装置において、

前記波面計測器は、

計測時に前記被計測光学系を通った光が入射する受光光学系と；

該受光光学系を介して前記光を受光する受光素子を含む受光部と；

前記受光光学系と前記受光部とを所定の位置関係で保持する筐体と；

前記筐体に固定された少なくとも1つの温度センサと；

前記被計測光学系及び前記受光光学系全体の波面収差の計測を行うとともに、その計測中の前記温度センサの測定結果に基づいて所定のタイミングで前記受光光学系単独の波面収差の計測を実行する制御装置と；を有することを特徴とする結像特性計測装置。

25. 請求項21に記載の結像特性計測装置と；

前記結像特性計測装置による計測結果に基づいて、前記光学系の結像特性を補正する補正装置と；を備える結像特性補正装置。

26. エネルギービームによりパターンが形成されたマスクを照明し、前記パターンを投影光学系を介して基板に転写する露光装置であって、

前記投影光学系の結像特性を補正する請求項25に記載の結像特性補正装置と；

前記結像特性補正装置が備える前記空間像計測器及び前記波面計測器を搭載可能で、前記基板を保持する基板ステージと；を備える露光装置。

27. 請求項26に記載の露光装置において、

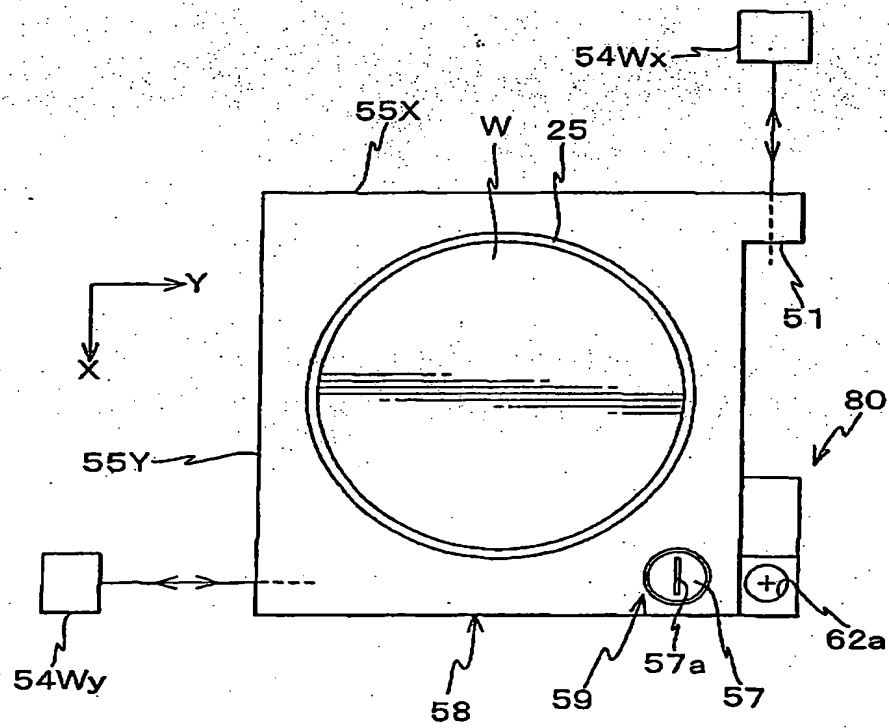
前記波面計測器は、前記基板ステージに対して着脱自在であることを特徴とする露光装置。

28. 請求項27に記載の露光装置において、

前記マスクが載置されるとともに、前記空間像計測器で計測される計測用パターンが形成された基準部材が設けられた、マスクステージを更に備えることを特徴とする露光装置。

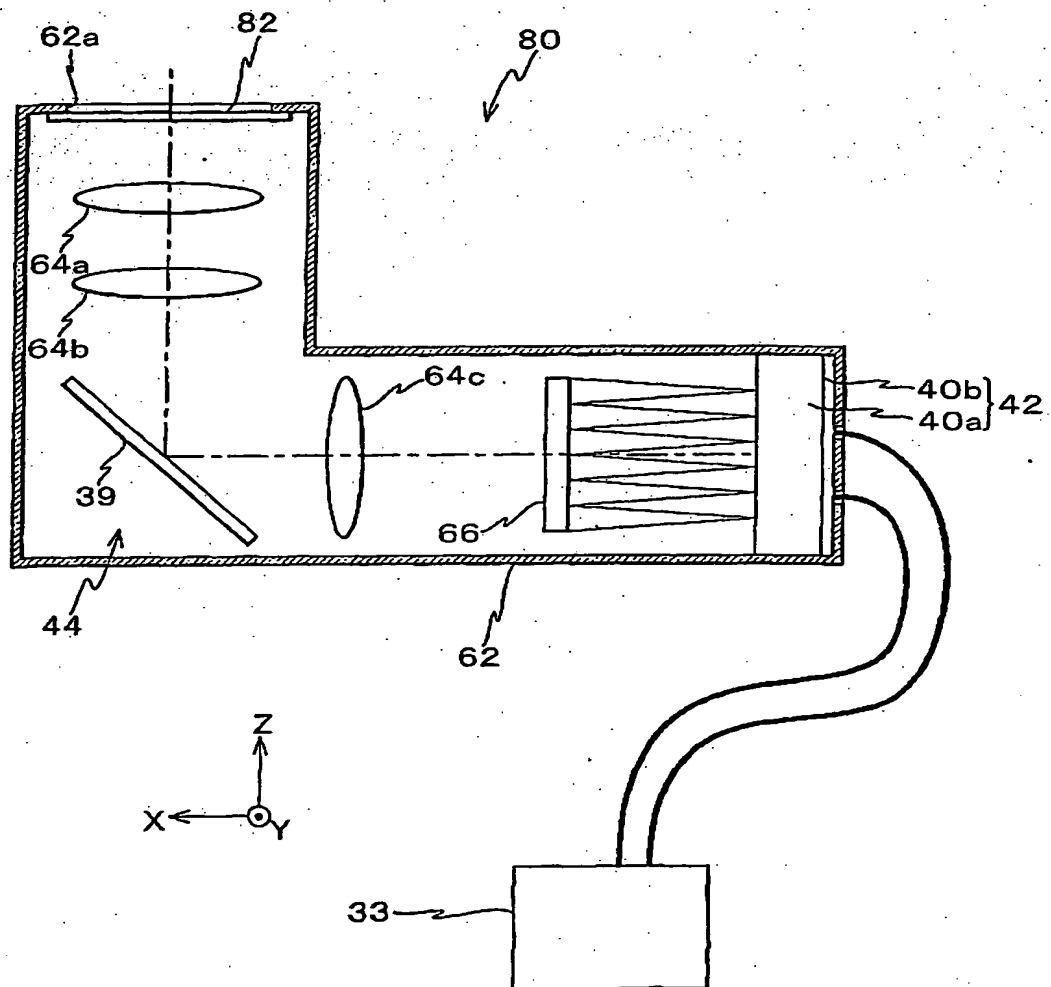
2/14

Fig. 2



3 / 1 4

Fig. 3



4 / 1 4

Fig. 4A

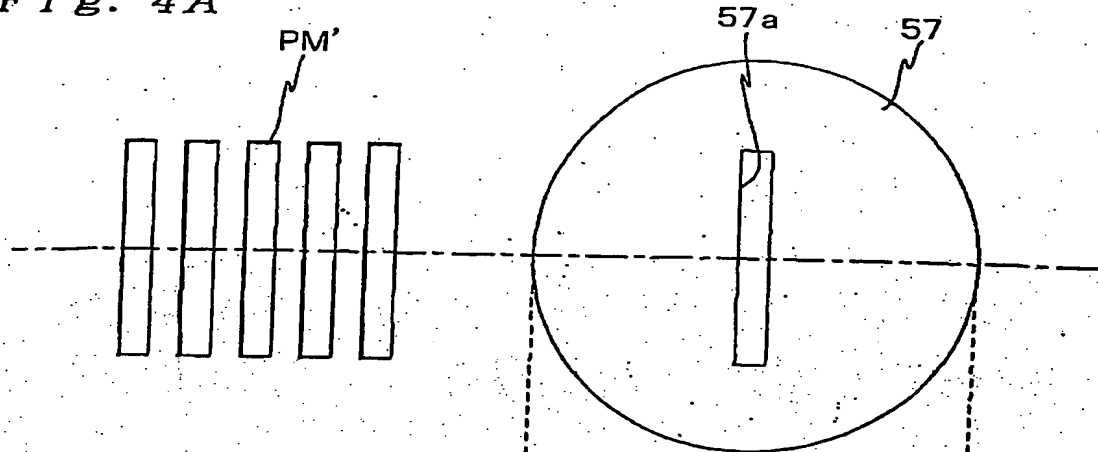


Fig. 4B

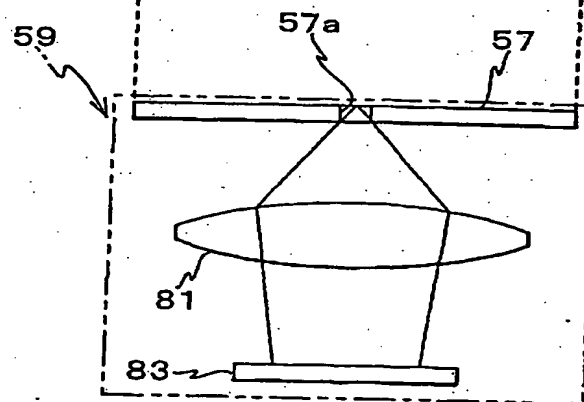
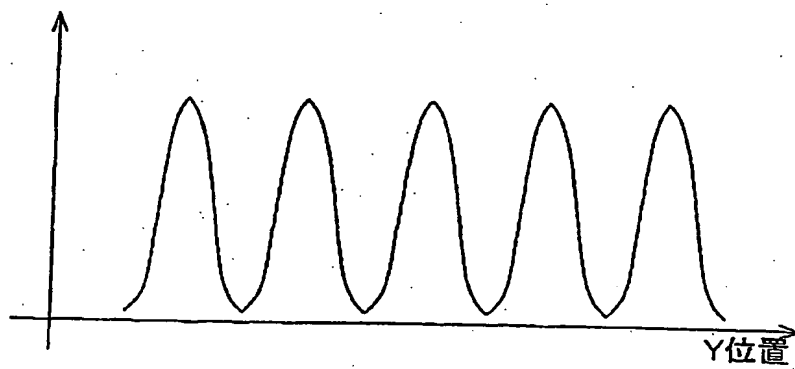


Fig. 4C



5 / 14

Fig. 5A

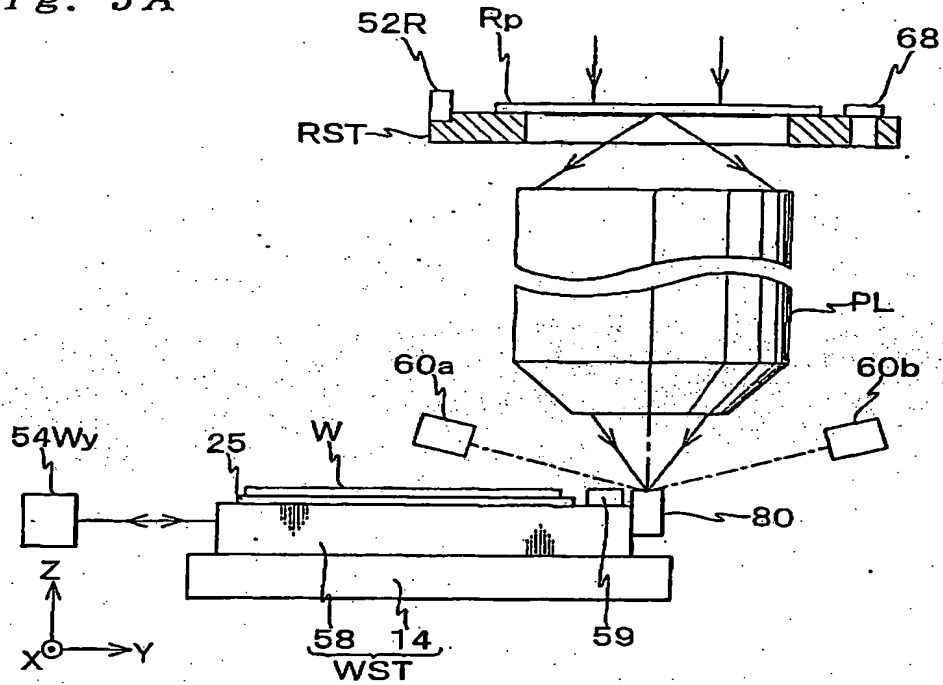
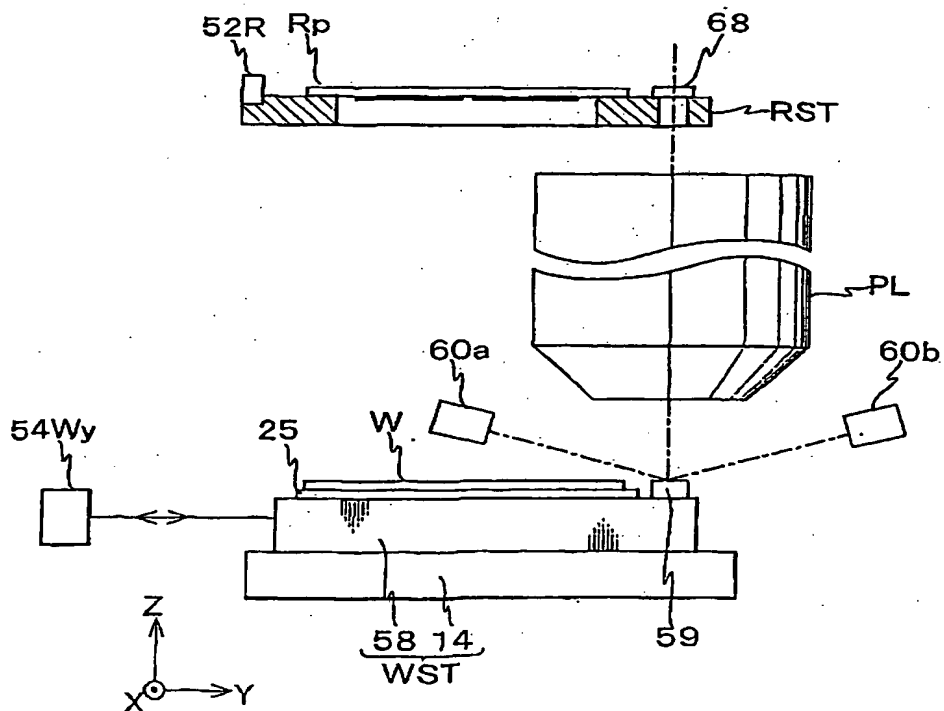


Fig. 5B



6/14

Fig. 6A

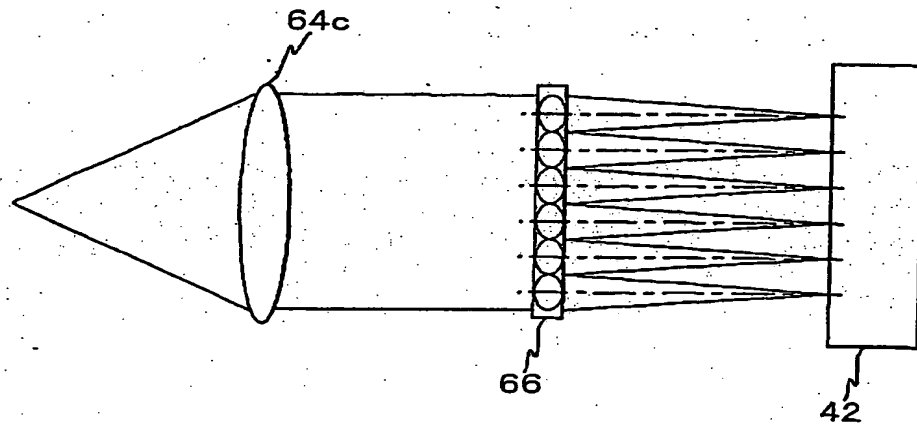
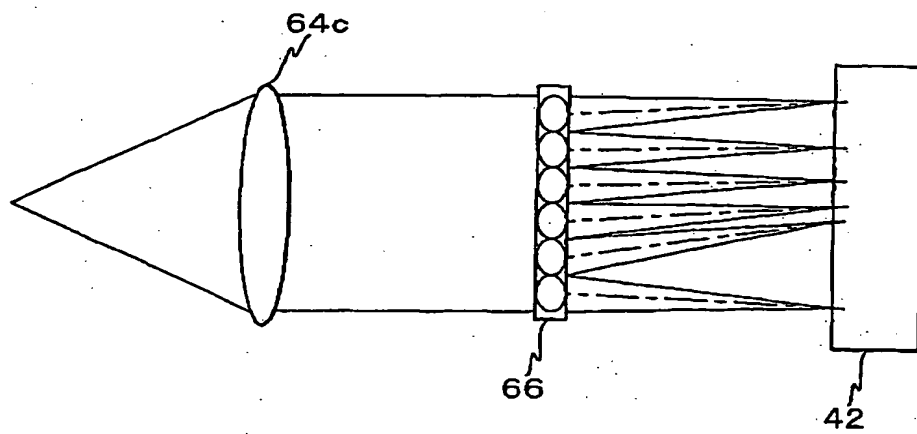


Fig. 6B



7/14

Fig. 7A

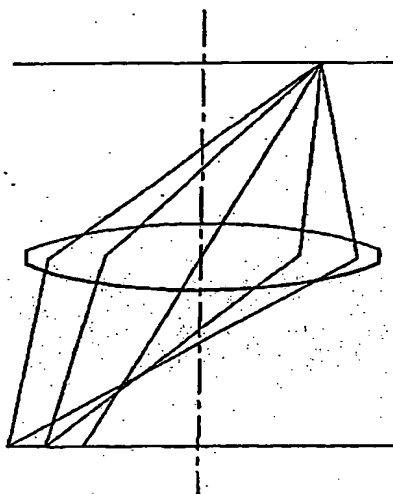
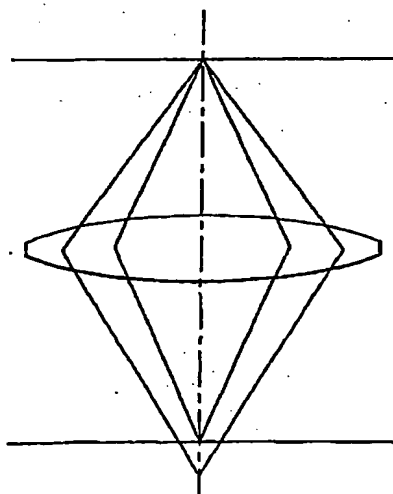
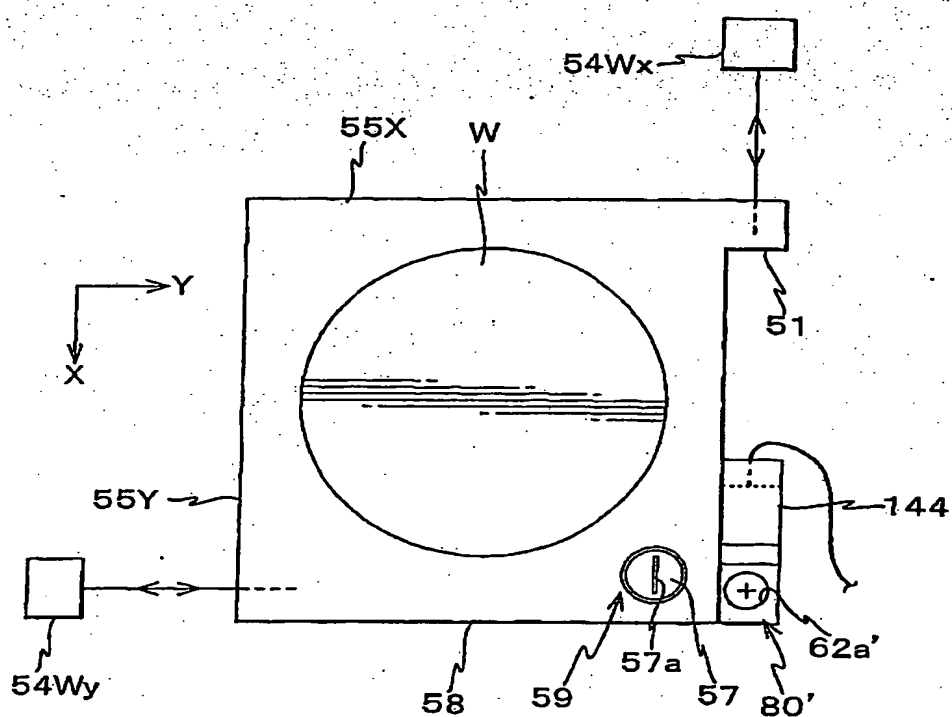


Fig. 7B



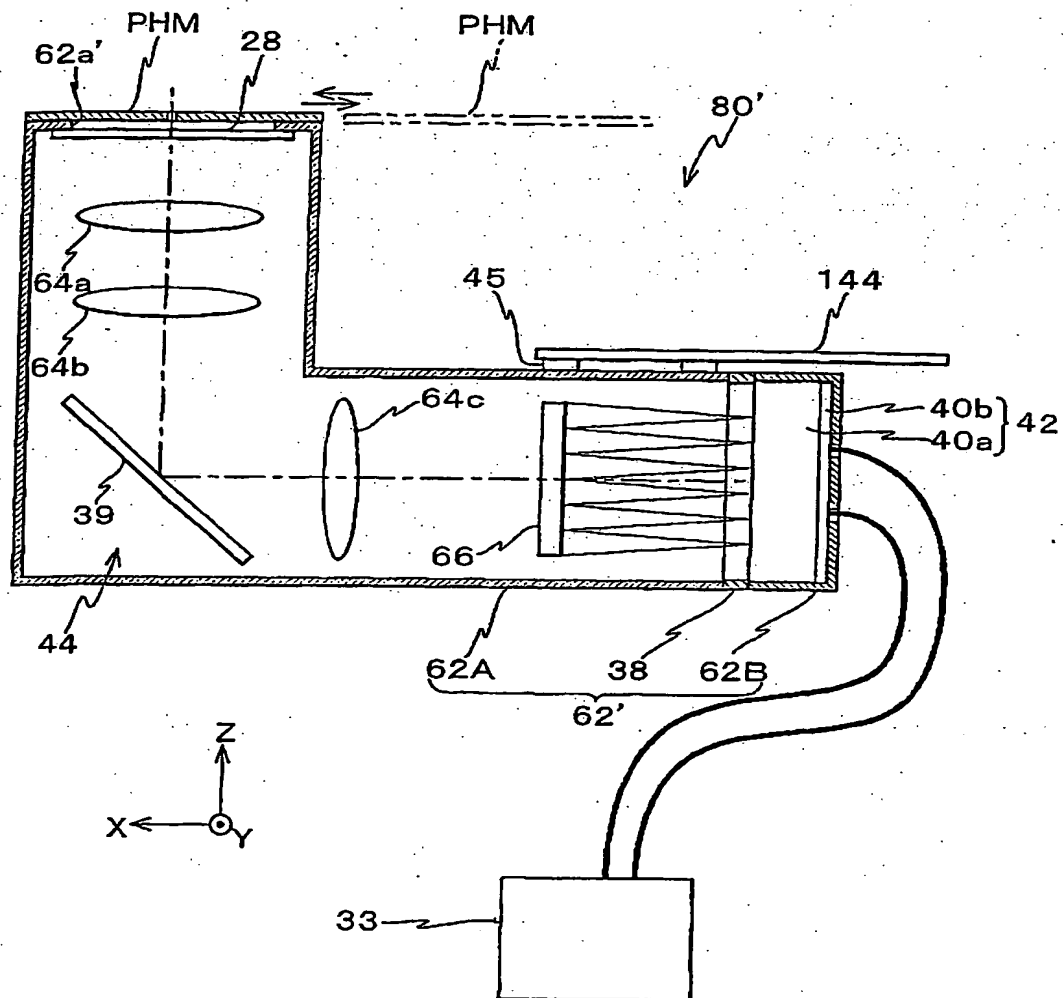
8/14

Fig. 8



9/14

Fig. 9



10/14

Fig. 10A

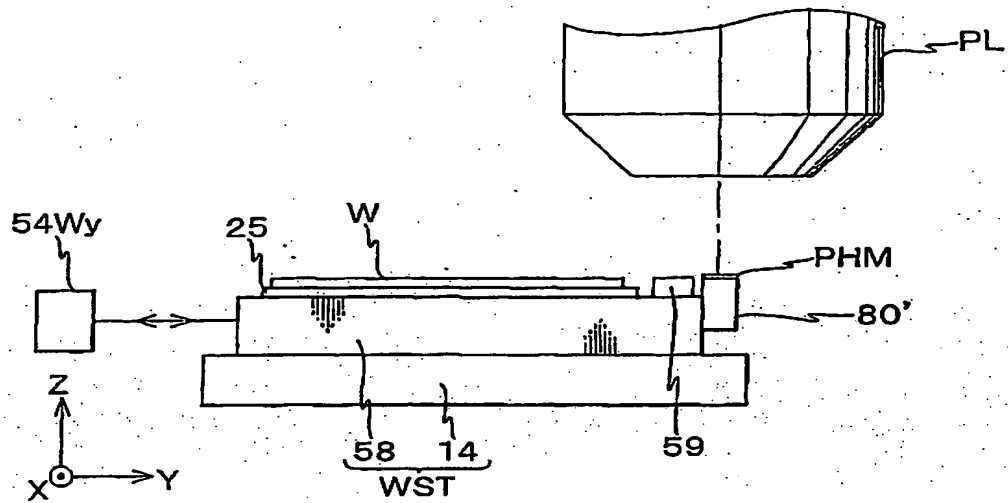
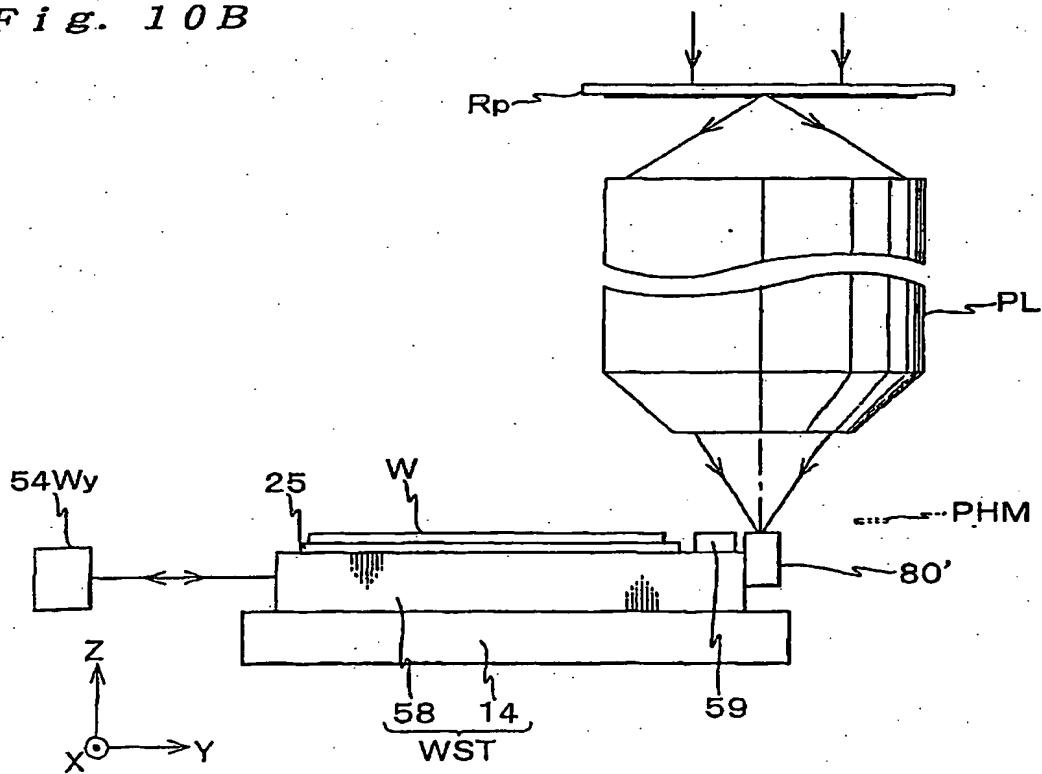
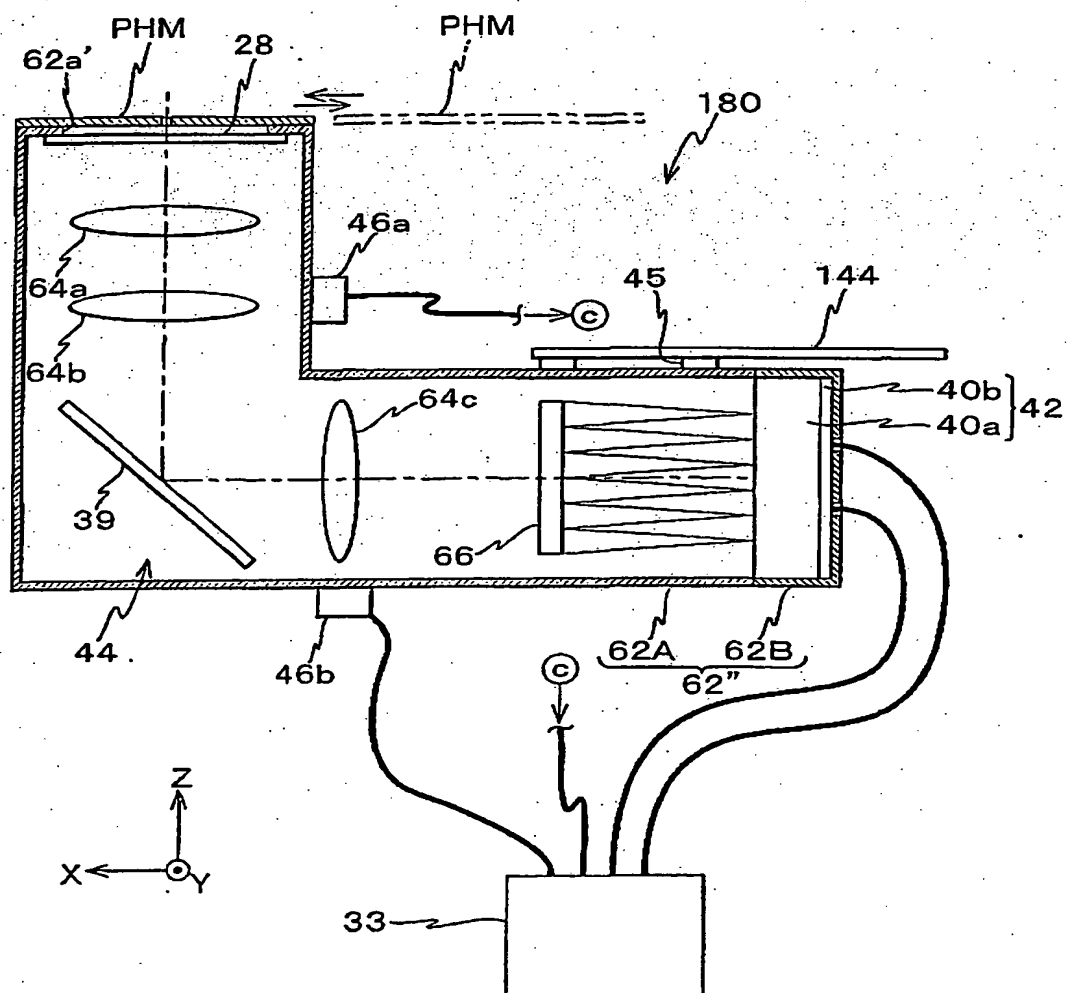


Fig. 10B



11/14

Fig. 11



12/14

Fig. 12A

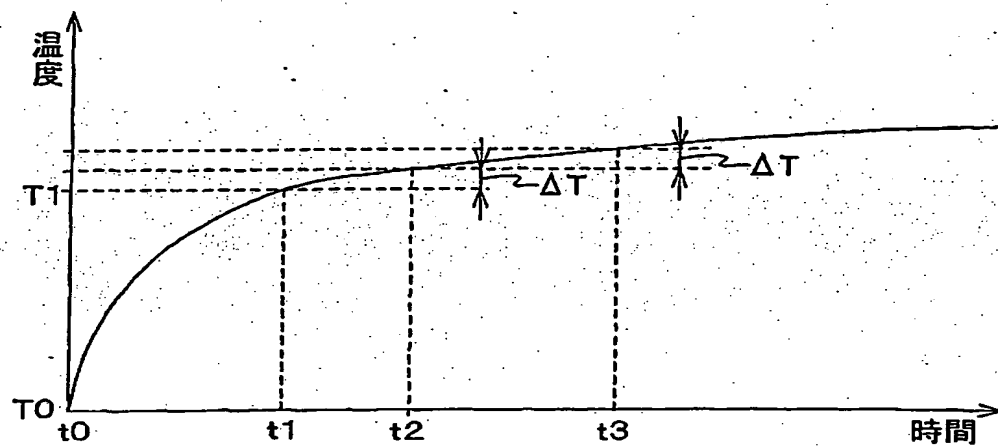
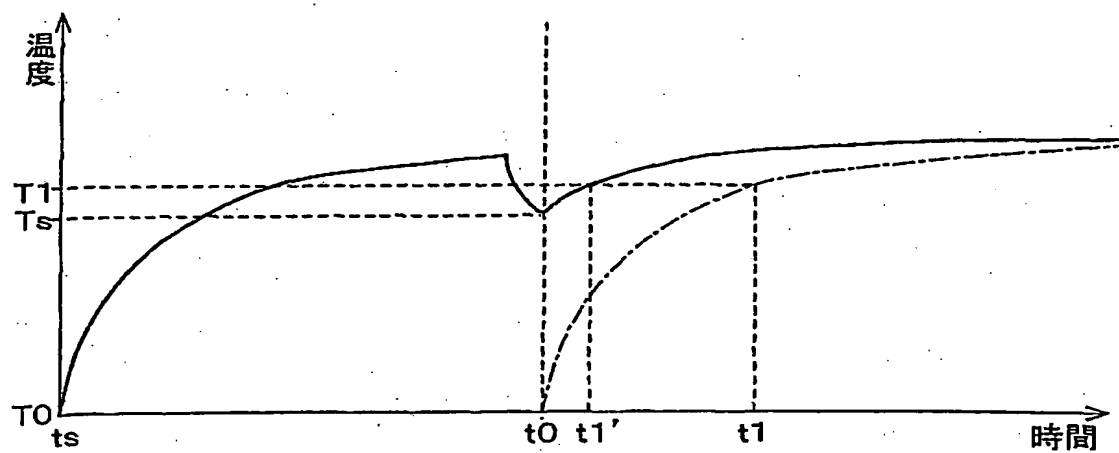


Fig. 12B



13/14

Fig. 13A

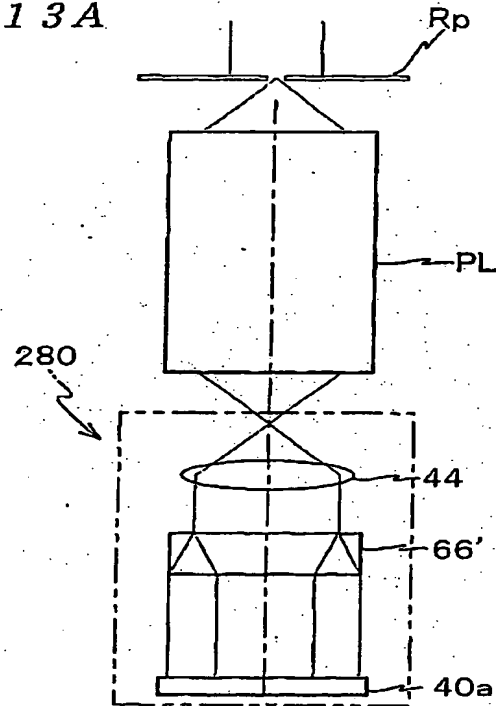
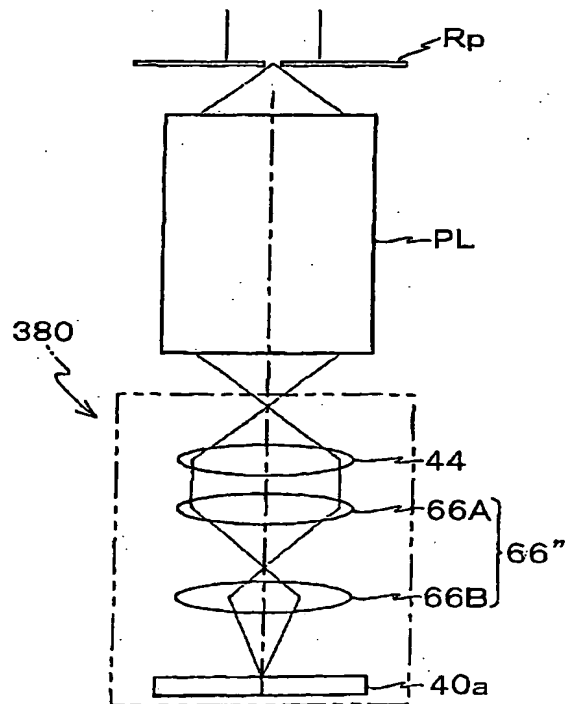
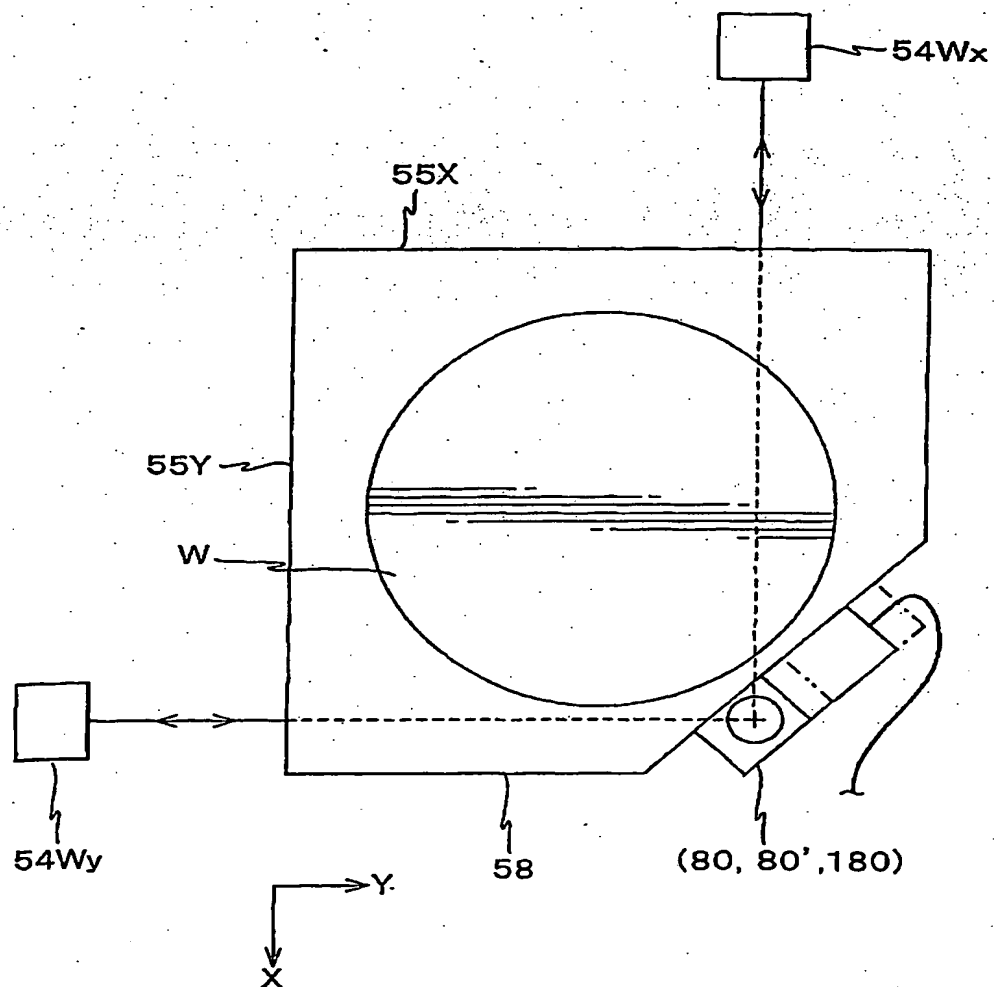


Fig. 13B



14/14

Fig. 14



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP01/11044

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl.⁷ G01M11/02, H01L21/027, G03F7/20

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl.⁷ G01M11/00-11/02, H01L21/027, G03F7/20-7/207

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2002
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2002 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2002

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and; where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 8-86689 A (Mitsubishi Electric Corporation), 02 April, 1996 (02.04.1996), Par. Nos. [0036], [0059] to [0063]; Fig. 3 Full text; Figs. 1 to 13 (Family: none)	6, 7 1-5, 8-28
Y A	JP 2000-294488 A (Canon Inc.), 20 October, 2000 (20.10.2000), Full text; Figs. 1 to 5 Full text; Figs. 1 to 5 (Family: none)	6, 7, 10, 14, 15, 19, 21, 25 1-5, 8, 9, 11-13, 16-18, 20, 22-24, 26-28
Y A	JP 11-251225 A (Nikon Corporation), 17 September, 1999 (17.09.1999), Full text; Figs. 1 to 7 Full text; Figs. 1 to 7 (Family: none)	10, 14, 15, 19, 21, 25 1-9, 11-13, 16-18, 20, 22-24, 26-28

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
 "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 "E" earlier document but published on or after the international filing date
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
24 January, 2002 (24.01.02)Date of mailing of the international search report
05 February, 2002 (05.02.02)Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP01/11044

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2000-91209 A (Nikon Corporation), 31 March, 2000 (31.03.2000), Full text; Figs. 1 to 8	6, 7, 10, 14, 15, 19, 21, 25
A	Full text; Figs. 1 to 8 & US 6266389 A	1-5, 8, 9, 11-13, 16-18, 20, 22-24, 26-28
Y	JP 10-289865 A (Nikon Corporation), 27 October, 1998 (27.10.1998), Full text; Figs. 1 to 13	10, 14, 15, 19, 21, 25
A	Full text; Figs. 1 to 13 (Family: none)	1-9, 11-13, 16-18, 20, 22-24, 26-28
Y	JP 2000-47103 A (Nikon Corporation), 18 February, 2000 (18.02.2000), Full text; Figs. 1 to 11	10, 14, 15, 19, 21, 25
A	Full text; Figs. 1 to 11 (Family: none)	1-9, 11-13, 16-18, 20, 22-24, 26-28

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP01/11044

Box I Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 1 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☐ Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:
2. ☐ Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:
3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

Box II Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 2 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

Claims 1-9, 22-24 are directed to a wavefront measuring apparatus, an exposure apparatus, or a wavefront measuring method which are inventions to solve the technical problem that a change in temperature is caused and that errors are produced in measurement and apparatus functions depending on how the temperature distribution is. The invention of Claims 10-21, 25-28 do not cope with the temperature problem.

1. ☐ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. ☒ As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fee, this Authority did not invite payment of any additional fee.
3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
4. ☐ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

Remark on Protest ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest.
☐ No protest accompanied the payment of additional search fees.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl. G01M11/02, H01L21/027, G03F7/20

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl. G01M11/00-11/02, H01L21/027, G03F7/20-7/207

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年
 日本国公開実用新案公報 1971-2002年
 日本国登録実用新案公報 1994-2002年
 日本国実用新案登録公報 1996-2002年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y A	JP 8-86689 A (三菱電機株式会社) 1996.04.02 段落番号【0036】、【0059】-【0063】、第3図 全文、第1-13図 (ファミリーなし)	6,7 1-5, 8-28

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

24.01.02

国際調査報告の発送日

05.02.02

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)
 郵便番号100-8915
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

菊井 広行



2W

7324

電話番号 03-3581-1101 内線 6621

C (続き) . 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	JP 2000-294488 A (キャノン株式会社) 2000. 10. 20 全文, 第1-5図	6, 7, 10, 14, 15, 19, 21, 25
A	全文, 第1-5図 (ファミリーなし)	1-5, 8, 9, 11- 13, 16-18, 20, 22-24, 26-28
Y	JP 11-251225 A (株式会社ニコン) 1999. 09. 17 全文, 第1-7図	10, 14, 15, 19, 21, 25
A	全文, 第1-7図 (ファミリーなし)	1-9, 11-13, 16 -18, 20, 22- 24, 26-28
Y	JP 2000-91209 A (株式会社ニコン) 2000. 03. 31 全文, 第1-8図	6, 7, 10, 14, 15, 19, 21, 25
A	全文, 第1-8図 & US 6266389 A	1-5, 8, 9, 11- 13, 16-18, 20, 22-24, 26-28
Y	JP 10-289865 A (株式会社ニコン) 1998. 10. 27 全文, 第1-13図	10, 14, 15, 19, 21, 25
A	全文, 第1-13図 (ファミリーなし)	1-9, 11-13, 16 -18, 20, 22- 24, 26-28
Y	JP 2000-47103 A (株式会社ニコン) 2000. 02. 18 全文, 第1-11図	10, 14, 15, 19, 21, 25
A	全文, 第1-11図 (ファミリーなし)	1-9, 11-13, 16 -18, 20, 22- 24, 26-28

第I欄 請求の範囲の一部の調査ができないときの意見 (第1ページの2の続き)

法第8条第3項 (PCT17条(2)(a)) の規定により、この国際調査報告は次の理由により請求の範囲の一部について作成しなかった。

1. ☐ 請求の範囲 _____ は、この国際調査機関が調査をすることを要しない対象に係るものである。つまり、
2. ☐ 請求の範囲 _____ は、有意義な国際調査をすることができる程度まで所定の要件を満たしていない国際出願の部分に係るものである。つまり、
3. ☐ 請求の範囲 _____ は、従属請求の範囲であってPCT規則6.4(a)の第2文及び第3文の規定に従って記載されていない。

第II欄 発明の単一性が欠如しているときの意見 (第1ページの3の続き)

次に述べるようにこの国際出願に二以上の発明があるとこの国際調査機関は認めた。

請求項1-9, 22-24は、波面計測装置や露光装置または波面計測方法において温度変化が生じたり、温度分布がどうであるかということによって、計測や装置機能に狂いが生じることがないようにしようという技術課題を解決するための発明であるのに、請求項10-21, 25-28に記載の発明は、温度問題についての取り扱いを全く含まないものである。

1. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料をすべて期間内に納付したので、この国際調査報告は、すべての調査可能な請求の範囲について作成した。
2. ☒ 追加調査手数料を要求するまでもなく、すべての調査可能な請求の範囲について調査することができたので、追加調査手数料の納付を求めなかった。
3. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を一部のみしか期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、手数料の納付のあった次の請求の範囲のみについて作成した。
4. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、請求の範囲の最初に記載されている発明に係る次の請求の範囲について作成した。

追加調査手数料の異議の申立てに関する注意

- ☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがあった。
☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがなかった。

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.